



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **“DISEÑO MECÁNICO DE UNA BOTA DE GAS DE 5000GLS”**

**ROMERO MORALES ESTALIN JOSÉ**

## **TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de:**

## **INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR  
2015**

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

**2014-10-03**

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**ESTALIN JOSE ROMERO MORALES**

Titulada:

**“DISEÑO MECÁNICO DE UNA BOTA DE GAS DE 5000 GLS”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Mariana Villa  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

Ing. Javier Orna  
**ASESOR DE TESIS**

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** ESTALIN JOSE ROMERO MORALES

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DISEÑO MECÁNICO DE UNA BOTA DE GAS DE 5000GLS”

**Fecha de Examinación:** 2015-07-02

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marco Santillán Gallegos <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Mariana Villa. O <b>DIRECTOR DE TESIS</b>			
Ing. Javier Orna Ch. <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teórico - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

Estalin José Romero Morales

## **DEDICATORIA**

El tiempo y esfuerzo del presente trabajo se lo dedico a mi Patria, a mi madre, hermanos y a toda mi familia en general, ya que con el regalo de ser ecuatoriano y el recibir una educación pública de calidad, sumado al apoyo, comprensión y demás muestras de afecto que solo una familia pueden brindar, he logrado posicionar las metas que me deparan, además de ser lo que soy actualmente.

**Estalin Romero Morales**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la vida por darme la oportunidad de estar en este mundo, en especial a mi madre, Jakelin, quien siempre me dio su apoyo y cariño incondicional cuando lo necesité. A mis hermanos: Tania, Eva, Melissa y Marco, a todos los amigos, compañeros y personas que me apoyaron de una u otra manera, a Ana y Mary de T! que me animaron con su buena onda y motivación, a los Ingenieros Mariana Villa y Javier Orna que fueron un apoyo fundamental en la elaboración de la presente tesis y un agradecimiento al estado ecuatoriano y a su líder Rafael Correa, que me devolvió la esperanza y fe en mi país. Les agradezco mucho.

**Estalin Romero Morales**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación .....	1
1.2.1 <i>Justificación técnica.</i> .....	1
1.2.2 <i>Justificación económica.</i> .....	2
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 <i>Objetivo general.</i> .....	2
1.3.2 <i>Objetivos específicos:</i> .....	2
1.4 Metodología .....	2
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	4
2.1 Marco conceptual .....	4
2.2 Generalidades .....	5
2.2.1 <i>Petróleo.</i> .....	5
2.2.1.1 <i>Gravedad API.</i> .....	6
2.2.2 <i>Descripción simplificada de un proceso de producción típico de petróleo y gas.</i> .....	7
2.2.3 <i>Separadores.</i> .....	8
2.2.3.1 <i>Clasificación de los separadores.</i> .....	9
2.2.3.2 <i>Separadores verticales.</i> .....	10
2.2.3.3 <i>Separadores horizontales.</i> .....	11
2.2.3.4 <i>Separadores de prueba.</i> .....	12
2.2.3.5 <i>Mecanismos de separación.</i> .....	13
2.2.3.6 <i>Factores que afectan la separación.</i> .....	14
2.2.3.7 <i>Elementos internos de un separador</i> .....	15
2.2.3.8 <i>Dispositivos de control.</i> .....	17
2.2.3.9 <i>Etapas de separación.</i> .....	18
2.2.3.10 <i>Selección de separadores.</i> .....	19
2.2.3.11 <i>Problemas de operación en separadores.</i> .....	20
2.2.4 <i>Bota de gas.</i> .....	22
2.2.4.1 <i>Elementos complementarios de una bota de gas.</i> .....	23
2.2.4.2 <i>Aspectos de diseño.</i> .....	25
2.2.4.3 <i>Aspectos constructivos de una bota de gas.</i> .....	28
<b>3. DISEÑO DE UNA BOTA DE GAS</b> .....	34
3.1 Diseño conceptual.....	34
3.2 Procedimiento de dimensionamiento hidráulico de una bota de gas .....	34
3.2.1 <i>Velocidad terminal de vapor:</i> .....	35
3.2.2 <i>Caudal volumétrico de vapor:</i> .....	36
3.2.3 <i>Diámetro interno mínimo del recipiente:</i> .....	36
3.2.4 <i>Caudal volumétrico del líquido:</i> .....	40
3.2.5 <i>Dimensiones requeridas para el extractor de niebla.</i> .....	40
3.2.6 <i>Altura de reducción.</i> .....	40
3.2.7 <i>Altura desde el nivel alto de líquido hasta la línea del eje axial de la boca de entrada:</i> .....	41
3.2.8 <i>Diámetro de salida de gas.</i> .....	42
3.2.9 <i>Altura del nivel bajo de líquido (HLLL ).</i> .....	42
3.2.10 <i>Volumen de surge.</i> .....	43
3.2.11 <i>Altura desde el nivel normal de líquido hasta el nivel alto:</i> .....	43

3.2.12	<i>Volumen de holdup</i> .....	44
3.2.13	<i>Diámetro de salida de líquido</i> .....	44
3.3	<i>Diseño mecánico de una bota de gas</i> .....	45
3.3.1	<i>Cuerpo del recipiente</i> .....	45
3.3.1.1	<i>Espesor requerido</i> .....	46
3.3.1.2	<i>Presión máxima de trabajo admisible</i> .....	47
3.3.1.3	<i>MDMT</i> .....	47
3.3.1.4	<i>Presión máxima admisible</i> .....	48
3.3.1.5	<i>Presión externa</i> .....	49
3.3.1.6	<i>Verificación de resistencia</i> .....	51
3.3.2	<i>Cabezas</i> .....	68
3.3.2.1	<i>Espesor de diseño para la presión interna bajo corrosión</i> .....	69
3.3.2.2	<i>Presión máxima de trabajo admisible bajo corrosión</i> .....	69
3.3.2.3	<i>Presión máxima admisible, nuevo</i> .....	69
3.3.3	<i>Bocas</i> .....	71
3.3.3.1	<i>Cálculo de la presión de trabajo máxima admisible (MAWP)</i> .....	71
3.3.3.2	<i>Cálculo de refuerzos bajo presión interna</i> .....	76
3.3.3.3	<i>Muestra de cálculo para la boca B5, cálculos bajo el MAP</i> .....	85
3.3.3.4	<i>Muestra de cálculo para la boca B5, cálculos bajo la MAEP</i> .....	86
3.3.4	<i>Anillo de refuerzo</i> .....	87
3.3.4.1	<i>Momento de inercia teórico y requerido UG-29</i> .....	89
3.3.4.2	<i>Verificación de soldas en el anillo UG-30</i> .....	89
3.3.5	<i>Faldón</i> .....	91
3.3.6	<i>Base de faldón</i> .....	92
3.3.7	<i>Oreja de izaje</i> .....	98
3.3.7.1	<i>Fuerzas en el izaje</i> .....	100
3.3.7.2	<i>Esfuerzo de la placa que conforma la oreja de izaje</i> .....	104
3.3.8	<i>Trunnion</i> .....	109
3.3.8.1	<i>Oreja de izaje</i> .....	110
3.3.8.2	<i>Pad de refuerzo</i> .....	115
3.3.8.3	<i>Tubo</i> .....	116
3.3.9	<i>Eliminador de niebla</i> .....	118
3.4	<i>Resultados obtenidos tras el diseño</i> .....	119
3.4.1	<i>Presiones</i> .....	119
3.4.2	<i>Espesores</i> .....	120
3.4.3	<i>Pesos</i> .....	120
3.4.4	<i>Bocas</i> .....	121
3.5	<i>Lista de materiales</i> .....	122
3.6	<i>Procedimiento de pintura</i> .....	123
<b>4.</b>	<b>COSTOS DE CONSTRUCCIÓN</b> .....	126
4.1	<i>Introducción</i> .....	126
4.2	<i>Costos directos</i> .....	126
4.3	<i>Costos indirectos</i> .....	127
4.4	<i>Viabilidad del proyecto</i> .....	127
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	129
5.1	<i>Conclusiones</i> .....	129
5.2	<i>Recomendaciones</i> .....	131

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS

## PLANOS



## LISTA DE TABLAS

		Pág.
1	Parámetros de selección de separadores.....	20
2	Datos de operación para el diseño de la bota de gas .....	35
3	Geometría de cabeza .....	38
4	Orientación y dimensiones de bocas .....	44
5	Ubicación de soldaduras longitudinales .....	45
6	Espesores requeridos bajo presión y cargas externas.....	68
7	MAWP en bocas.....	76
8	Cálculos de áreas y espesores bajo el MAWP de la boca B5.....	85
9	Análisis de cargas en soldaduras bajo el MAWP de la boca B5 .....	85
10	Cálculos del dimensionamiento de suelda bajo el MAWP de la boca B5 .....	85
11	Cálculos de áreas y espesores bajo el MAP de la boca B5 .....	86
12	Análisis de cargas en soldaduras bajo el MAP de la boca B5.....	86
13	Cálculos del dimensionamiento de suelda bajo el MAP de la boca B5 .....	86
14	Cálculos de áreas y espesores bajo el MAEP de la boca B5.....	87
15	Cálculos del dimensionamiento de suelda bajo el MAEP de la boca B5 .....	87
16	Cargas significativas en elementos de izaje con respecto a su inclinación	100
17	Resumen de presiones.....	119
18	Resumen de espesores.....	120
19	Resumen de pesos.....	120
20	Cordones de suelda en bocas .....	121
21	Características de bocas .....	121
22	Resumen de bocas.....	121
23	Cargas de viento y sismo .....	122
24	Lista de materiales .....	122
25	Horas de trabajo según etapas de construcción .....	127
26	Resumen de costos de la bota de gas.....	128
27	Normas y grados de preparación de superficie.....	30

## LISTA DE FIGURAS

		Pág.
1	Descripción simplificada de la producción de petróleo y gas .....	7
2	Separador horizontal .....	8
3	Tipos de separadores mecánicos .....	9
4	Esquema de un separador vertical trifásico común.....	11
5	Esquema de un separador horizontal trifásico común.....	12
6	Separador de prueba.....	13
7	Componentes internos de un separador.....	15
8	Tipos de eliminadores de niebla .....	15
9	Ubicación de eliminadores de niebla en separadores .....	16
10	Tipos de soportes para eliminadores de niebla .....	16
11	Deflector .....	16
12	Vórtices y rompe vórtices .....	17
13	Izaje de un separador vertical.....	22
14	Faldón .....	23
15	Soporte de línea .....	24
16	Boca de mantenimiento y davit.....	24
17	Trunnion .....	24
18	Fallas comunes en orejas de izaje.....	25
19	Disposición de esfuerzos en el cuerpo de un recipiente a presión .....	26
20	Disposición de cargas sobre el cuerpo de un recipiente a presión.....	27
21	Tipos de cabezas en recipientes a presión .....	29
22	Geometría de cabezaFuente: El autor .....	38
23	Nomenclatura de la base del faldón.....	93
24	Nomenclatura para orejas de izaje .....	99
25	Diagrama de cuerpo libre del izaje.....	100
26	Comportamiento de cargas en elementos de izaje con respecto a su inclinación .....	101
27	Falla de tipo doble plano y nomenclatura asociada .....	103
28	Esfuerzos en soldadura y nomenclatura asociada.....	104
29	Nomenclatura asociada a trunnion .....	109
30	Fallas en trunnion y nomenclatura asociada .....	112
31	Cordones de suelda en bocas .....	121
32	Tipos de soldadura .....	31

## LISTA DE ABREVIACIONES

UBC	Código uniforme de la construcción (Uniform Building Code)
NEC	Norma Ecuatoriana de Construcción
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers)
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials)
AISI	Instituto Americano de Acero y Hierro (American Iron and Steel Institute)
ASCE	Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (American Society of Civil Engineers)
API	Instituto Americano del Petróleo (the American Petroleum Institute)
ANSI	Instituto Nacional Americano de Estándares (American National Standards Institute)
AWS	Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society)
GOR	Razón Petróleo – Gas (Gas – Oil Ratio)
GOSP	Planta de Separación de Gas y Petróleo (Gas – Oil Separation Plant)
MAWP	Presión de Trabajo Máxima Admisible (Maximum Allowable Working Pressure)
MDMT	Temperatura Mínima de Diseño del Metal (Minimum Design Metal Temperature)
MAP	Presión Máxima Admisible (Maximum Allowable Pressure)
MAEP	Presión Externa Máxima Admisible (Maximum Allowable External Pressure)
WRC	Consejo de Investigación de Soldadura (Welding Research Council)
SSPC	Consejo de Pintura para Estructuras de Acero (Steel Structures Painting Council)
WPQ	Calificación del Desempeño del Soldador (Welder Performance Qualification)
PQR	Registro de Calificación de Procedimiento (Procedure Qualification Record)
WPS	Especificaciones del procedimiento de Soldadura (Welding Procedure Specification)
TIG	Soldadura por gas inerte de tungsteno (Tungsten Inert Gas)
SAW	Soldadura por arco sumergido (Submerged Arc Welding)
SMAW	Sistema de soldadura por arco manual (Welding Arc Manual System)
FCAW	Soldadura por arco con núcleo de fundente (Flux Cored Arc Welding)

## LISTA DE ANEXOS

- 1 Esquema de una Bota de Gas
- 2 Separador vertical bifásico
- 3 Factor K para el cálculo de la velocidad terminal del vapor
- 4 Recomendaciones para tiempos de Surge y Holdup
- 5 Recomendaciones de alturas para el nivel bajo de líquido
- 6 Criterios para la selección de cabezas en recipientes a presión
- 7 Propiedades de los aceros más utilizados en recipientes a presión
- 8 Esfuerzo admisible máximo por tensión en aceros al carbono y baja aleación
- 9 Eficiencias en juntas de soldadura según su tipo
- 10 Factor "M" para el cálculo de parámetros de cabezas Toriesféricas
- 11 Eficiencia de impactación E
- 12 Parámetros geométricos de diferentes tipos de cabezas
- 13 Parámetros geométricos de diferentes tipos de cabezas
- 14 Factor "A" para el cálculo de la presión externa admisible
- 15 Factor "B" para el cálculo de la presión externa admisible
- 16 Coeficiente "Ce" Combinación de altura, exposición y factor Gust
- 17 Coeficiente "Cq" de fuerza de viento
- 18 Factor de importancia "Iw"
- 19 Presión de estancamiento del viento "qs"
- 20 Número de Lobes
- 21 Factor "Z" para diseño sísmico
- 22 Factor de reducción de respuesta "R"
- 23 Clasificación de los perfiles de suelo
- 24 Coeficientes de amplificación de suelo: Fa, Fd, Fs
- 25 Coeficientes de irregularidad en planta
- 26 Coeficientes de irregularidad en elevación
- 27 Factor "F" para el cálculo de áreas en bocas
- 28 Nomenclatura para refuerzos en bocas
- 29 Espesores mínimos requeridos para bocas
- 30 Parámetros de pernos de anclaje
- 31 Parámetros para el diseño de la base del faldón
- 32 Sillas o refuerzos para pernos de anclaje en recipientes altos
- 33 Aspectos constructivos de un Manhole
- 34 Aspectos constructivos de un Extractor de Niebla
- 35 Aspectos constructivos de aperturas en faldón
- 36 Aplicación y símbolos de soldadura
- 37 Aplicación y símbolos de soldadura
- 38 Configuración de aperturas con placa de refuerzo
- 39 Estilos de eliminadores de niebla
- 40 Electrodo para aceros inoxidables con aceros al carbono
- 41 Electrodo para aceros inoxidables con aceros al carbono
- 42 Tipos de juntas soldadas y sus dimensiones geométricas
- 43 Tipos de juntas soldadas y sus dimensiones geométricas
- 44 Factor de importancia sísmica "I"
- 45 Diagrama de flujo para determinar el MAWP en bocas

46	Diseño de juntas soldadas
47	Diseño de juntas soldadas
48	Diseño de juntas soldadas
49	Reglas para determinar el MDMT sin prueba de impacto
50	Curvas de exención de pruebas de impacto
51	Reducción del MDMT sin prueba de impacto
52	Algunos detalles típicos de espesores gobernantes
53	Algunos detalles típicos de espesores gobernantes
54	Recubrimiento teórico en pintura
55	SIGMAZINC 158, datasheet
56	SIGMAZINC 158, datasheet
57	SIGMAZINC 158, datasheet
58	SIGMACOVER 630, datasheet
59	SIGMACOVER 630, datasheet
60	SIGMADUR 550, datasheet
61	SIGMADUR 550, datasheet

## RESUMEN

Debido a que el fluido primario proveniente de pozos petroleros es una mezcla de: agua, arena, gas y petróleo; toda planta hidrocarburífera midstream necesita un número determinado de etapas de separación, y por ende, recipientes a presión concebidos para este fin. Si bien existe una gran demanda de separadores así como procedimientos de diseño, el presente trabajo tiene la finalidad de proveer al proyectista una metodología de diseño actualizada y práctica para el recipiente de la última etapa de separación (bota de gas); así como: lista de materiales, planos constructivos, costos de fabricación, muestra de cálculo para elementos ajenos al código ASME, y criterios técnicos producto del diseño global basados en normas y códigos nacionales e internacionales (ASME, NEC 2014, UBC 97, etc.).

Se analizaron parámetros del fluido de ingreso como presión, temperatura, relación gas-petróleo (GOR), con los cuales se realizó el diseño hidráulico que permitió la obtención de diámetros, alturas y tiempo de retención del fluido. Posteriormente, se llevó a cabo el diseño mecánico de los elementos constitutivos del separador; partes como cilindros, cabezas, anillo de refuerzo y bocas se basaron en el código ASME, complementados por los criterios de cargas combinadas propuestas por Berman. Finalmente, se desarrolló la lista de materiales, planos constructivos y análisis de costos.

Los resultados de la metodología propuesta permitieron concluir y aportar al sector metal mecánico nacional, que la presión externa gobierna el diseño de los cilindros del cuerpo, el MAWP más bajo es el gobernante de la cámara así como el MDMT más alto, los anillos de refuerzo actúan como arriostramiento al evitar el pandeo; derivando en una reducción de la sección del cuerpo a presión externa.

## **ABSTRACT**

Because the primary fluid from oil Wells is a mixture of water, sand, oil and gas; the midstream HYDROCARBON plant requires a specific number of separation stages, and therefore, pressure vessels designed for this purpose.

While there is a great demand for separators as well as design procedures, this research paper aims to provide the designer with an updated and practice design methodology for the container of the last stage of separation (gas boot); as well as, BOM, building plans, manufacturing costs, calculation sample for elements unrelated to the ASME code, and technical criteria results of a global design based on national and international standards and codes (ASME, NEC 2014, UBC 97, etc. ).

Parameters of input fluid such as: pressure, temperature, gas-oil ratio were analyzed (GOR), with which the hydraulic design was made obtaining diameters, heights and the fluid retention time.

Subsequently the mechanical design of the constituent elements of the separator was conducted; parts such as cylinder, heads, reinforcing ring and entrances, were based on the ASME code, and were supplemented by the combined loads criteria proposed by Bergman. Finally, the bill of materials, construction drawings and cost analysis was developed.

The results of the proposed methodology allow to contribute to the metal-mechanical domestic sector and concludes that external pressure rules the cylinder body design, the lower MAWP rules the camera as well as the highest MDMT. Reinforcement rings act as bracing to prevent sagging; therefore there is a diminution of body section to external pressure.

## **CAPÍTULO I**

### **1 INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 Antecedentes**

La necesidad de recipientes de proceso en la industria petrolera, se remonta desde el descubrimiento del petróleo y por ende las ventajas que éste ofrecía como una fuente de energía. En el caso específico de Ecuador se inició su explotación en los años sesenta, además de posicionarse como la primera fuente de ingresos del país, desde entonces diversas empresas petroleras nacionales e internacionales extraen el petróleo con altos estándares de calidad y seguridad. A medida que la tecnología hidrocarburífera en los distintos procesos avanzó, se desarrollaron nuevos y mejores recipientes para la optimización en el uso de todo el potencial energético del petróleo extraído.

De entre los requerimientos en planta surgió la bota de gas, que es un separador en posición vertical de los elementos constitutivos del petróleo extraído como el gas, el cual en sus inicios era desechado perdiendo así parte de la energía proporcionada. Como es natural todo dispositivo es perfectible tras superar los diversos problemas que van surgiendo en el camino, logrando así una mayor eficiencia en la función que desempeña.

En la actualidad este separador bifásico es muy utilizado en gran parte de los campos petrolíferos de extracción, debido a ello un correcto diseño de sus componentes y logística en su transporte e instalación son vitales para su correcto funcionamiento, precautelando así la vida útil de la bota de gas y la seguridad de la planta.

#### **1.2 Justificación**

**1.2.1 Justificación técnica.** La bota de gas es un tipo de separador muy utilizado en la industria petrolera, generalmente por los grandes beneficios que brinda, como por ejemplo su gran eficiencia en el servicio de aislar el gas del petróleo, el cual, es uno de los 4 elementos constitutivos que son separados comúnmente: agua, gas, sedimento y petróleo. Presenta buenas condiciones durante su funcionamiento y operación, responde excelentemente en medios corrosivos tales como la selva



ecuatoriana, así como las seguridades con las que cuenta para evitar posibles accidentes.

**1.2.2 Justificación económica.** Debido a la importancia y utilidad de la bota de gas en los procesos de extracción hidrocarburífera, las empresas nacionales e internacionales la adquieren con frecuencia. Si bien existen múltiples empresas que fabrican este tipo de recipiente, no hay un procedimiento accesible al proyectista que revele los aspectos constructivos y de diseño que conlleva la producción de una bota de gas. El motivo de este proyecto es realizar el diseño de la capacidad más comúnmente utilizada en estos separadores, aportando así con una metodología de diseño de los componentes que conforman la bota de gas, incluyendo además los planos constructivos y de detalle. Lo que derivaría en un ahorro relativo de recursos económicos.

### **1.3 Objetivos**

**1.3.1 Objetivo general.** Diseñar una bota de gas de 5000 GLS, cuyo desarrollo sirva como prototipo para la industria.

**1.3.2 Objetivos específicos:**

Recopilar y estudiar la literatura pertinente a este tipo de recipiente de proceso.

Sintetizar la literatura analizada para proponer y desarrollar el diseño de la bota de gas.

Realizar el procedimiento de diseño de una bota de gas.

### **1.4 Metodología**

Debido a la demanda de este tipo de separador en la industria petrolera, el presente trabajo busca dar una solución a ese requerimiento con un modelo y metodología de cálculo para la capacidad más común en la industria, para ello se propone la siguiente secuencia de elaboración del proyecto.

Investigación y recopilación de la bibliografía relacionada con el proyecto.

Dedución de la mejor alternativa de bota para la capacidad propuesta así como el procedimiento a seguir para su elaboración.

Diseño de: cuerpos, casquetes, faldón, elementos de izaje, anillo de refuerzo y bocas.

Se desarrollará la ingeniería de detalle.

Análisis global del diseño.

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Marco conceptual

*Separación.* Proceso por el cual se convierte una sustancia mezclada en dos o más productos distintos, los mismos que al estar separados podrían tener diferentes propiedades químicas o físicas.

*Mezcla.* Sistema material conformado por dos o más componentes unidos pero no combinados químicamente. Existen mezclas homogéneas y heterogéneas.

*Densidad.* Es una magnitud escalar entendida como la cantidad de masa en cierto volumen de una sustancia. Además, es la razón entre la masa y el volumen que ocupa.

*Presión.* Magnitud física que cuantifica la proyección de una fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, además, en cuestión de gases es el resultado macroscópico de las fuerzas implicadas por las colisiones de las moléculas del gas con las paredes del contenedor.

*Temperatura.* Es una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero o equilibrio termodinámico.

*Coalescencia.* Proceso mecánico por el cual se lleva a cabo la separación de fases como gas o líquidos no miscibles, por medio del agrupamiento de pequeñas gotas que por gravedad caen a un espacio predeterminado.

*Gravedad.* Es la fuerza específica que actúa sobre un cuerpo en el campo gravitatorio de otro. Es la fuerza de atracción hacia el centro de la tierra que actúa sobre todo cuerpo de menor masa que ella.

*Corrosión.* Es el deterioro o desgaste de un material como resultado del ataque electroquímico por su entorno.

## **2.2 Generalidades**

**2.2.1 *Petróleo.*** Es un fluido hidrocarburo de origen fósil, que está ubicado en arenas subterráneas a varios miles de pies por debajo de la superficie. Se define hidrocarburo a un componente orgánico formado únicamente por carbono e hidrógeno.

**De las propiedades físico-químicas que posee el petróleo se podrían mencionar:**

- Es un aceite compuesto básicamente por cadenas de carbono e hidrógeno.
- Líquido oscuro con tonalidad negra o verde dependiendo del tipo de yacimiento
- Consta de azufre y metales pesados como el vanadio.
- Más liviano y viscoso que el agua.
- En los yacimientos se presenta como una emulsión conformada por agua, que puede contener gas disuelto.
- Está formado por una familia de hidrocarburos, lo cual determina que propiedades como su peso molecular y temperatura de ebullición son el resultado global de todos sus componentes.

**Los hidrocarburos provenientes del petróleo se clasifican en:**

- Nafténicos
- Aromáticos
- Parafínicos
- Olefínicos

La emulsión es la mezcla homogénea entre un fluido orgánico, en este caso el petróleo e inorgánico como el agua, dando al fluido características no Newtonianas, es decir que la reología del fluido cambia según las condiciones de presión y temperatura. Además de la emulsión, se obtiene agua que proviene del mismo yacimiento conocida como agua libre.

El gas asociado al crudo es una masa de hidrocarburo liviana (peso molecular relativamente bajo) que se libera a una determinada condición de presión y temperatura. El tipo de gas disuelto se encuentra en el yacimiento formado por la mezcla de gas hidrocarburo (generalmente metano) y gases como dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y nitrógeno.

**2.2.1.1 Gravedad API.** Es una medida de densidad que en comparación con el agua, precisa cuán pesado o liviano es el petróleo. Tomando en cuenta que los valores superiores a 10 indican que son más livianos que el agua, por ende, flotarían en ésta. La clasificación del petróleo según su gravedad API se describe a continuación:

- Crudo liviano o ligero: tiene gravedades API mayores a 31,1 °API.
- Crudo medio o mediano: tiene gravedades API entre 22,3 y 31,1 °API.
- Crudo pesado: tiene gravedades API entre 10 y 22,3 °API.
- Crudo extrapesado: gravedades API menores a 10 °API.

### **La industria del petróleo**

La actual industrialización del petróleo se divide en tres grandes grupos:

Upstream: Área de la industria petrolera encargada de:

- Exploración de campos petroleros.
- Evaluación de yacimientos.
- Perforación de pozos.
- Comercialización de bloques (campos petroleros)

Midstream: Área de la industria petrolera orientada a:

- Deshidratación de crudo y separación de gas.
- Recuperación y aprovechamiento de gas.
- Tratamiento y disposición de agua de producción.
- Almacenamiento y transporte de petróleo.
- Comercialización de petróleo.

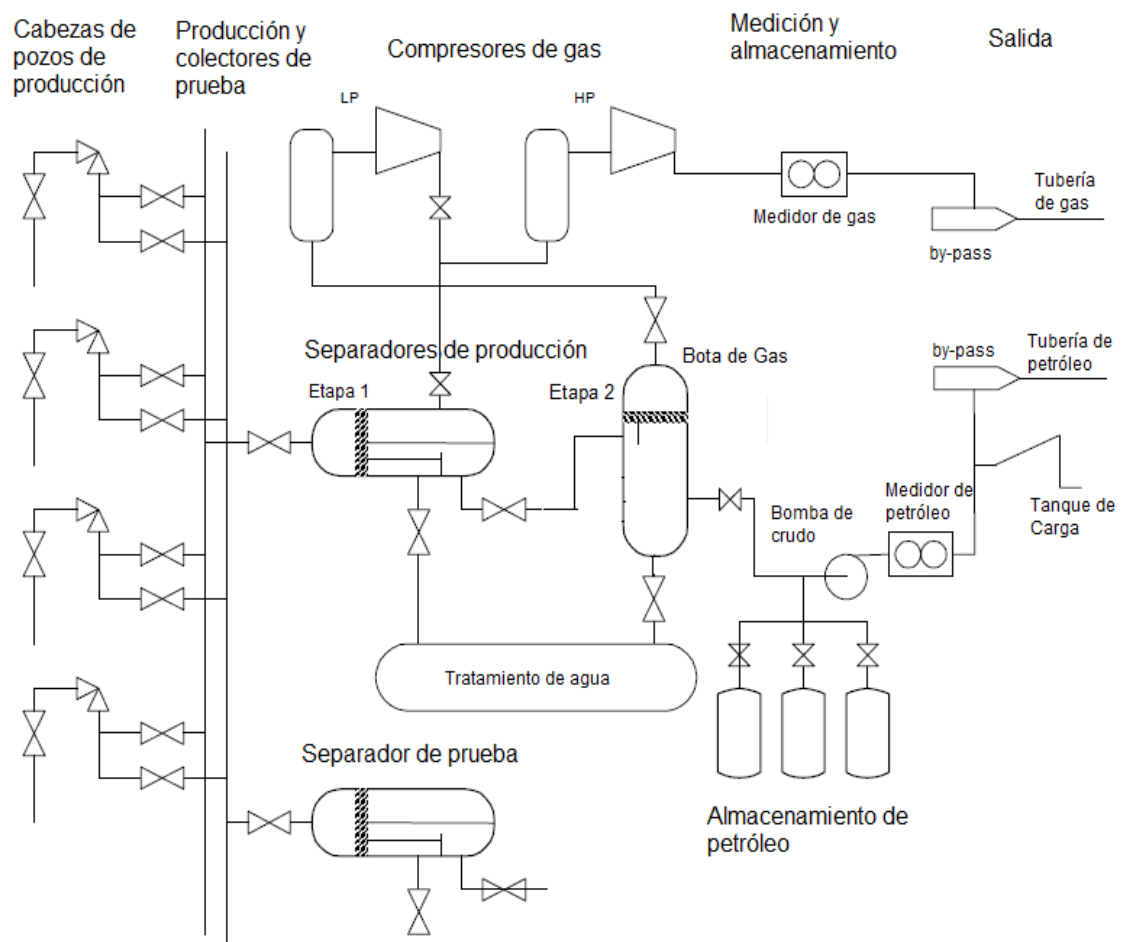
Downstream: Área de la industria petrolera que se encarga de:

- Refinación y petroquímica.
- Almacenamiento y transporte de derivados de petróleo.
- Comercialización de derivados de petróleo.

### 2.2.2 Descripción simplificada de un proceso de producción típico de petróleo y gas.

Hoy en día el petróleo y gas son producidos en al menos cada parte del mundo, desde pozos privados de 100 barriles al día hasta la gran cantidad de 4 000 barriles; en pozos poco profundos de 20 metros hasta de 3 000 metros de profundidad además de estar a 2 000 metros por debajo del agua; existen pozos con costos de producción en tierra de 10 000 dólares hasta 10 billones de dólares debajo del agua, a pesar de esto muchas partes del proceso son muy similares en principio.

Figura 1. Descripción simplificada de la producción de petróleo y gas



Fuente: (ABB, 2010 pág. 3)

En la parte izquierda de la Figura 1 se encuentran las cabezas de pozos, las cuales alimentan a los colectores de producción y de prueba, en un sistema de producción éste sería llamado como el sistema de recolección. El resto del diagrama es el proceso

convencional (GOSP). Mientras existen instalaciones solamente de petróleo o gas, a menudo el material que es extraído de los pozos consiste en una gama de hidrocarburos del gas (metano, butano, propano etc.), condensantes (hidrocarburos de densidad media) y petróleo.

Con el flujo del pozo también se puede obtener una variedad de componentes no deseados como: agua, dióxido de carbono, sales, azufre y arena. El propósito del GOSP es procesar el flujo primario del pozo en productos limpios y bien diferenciados como petróleo, gas natural y condensado. Una planta también incluye un número de sistemas utilitarios, que no son parte del proceso pero proveen: energía, agua, aire o cualquier necesidad de la planta. (ABB, 2010 págs. 2-4)

**2.2.3 Separadores.** Un separador es un recipiente metálico cerrado sujeto a una presión, temperatura y caudales previamente definidos. Con el fin de aislar o separar las diferentes fases que componen el flujo primario de un yacimiento. Compuesto por dispositivos mecánicos internos y externos, regido por estrictas normas de construcción, dimensionamiento y diseño. En un marco de seguridad, eficiencia y ahorro.

Figura 2: Separador horizontal



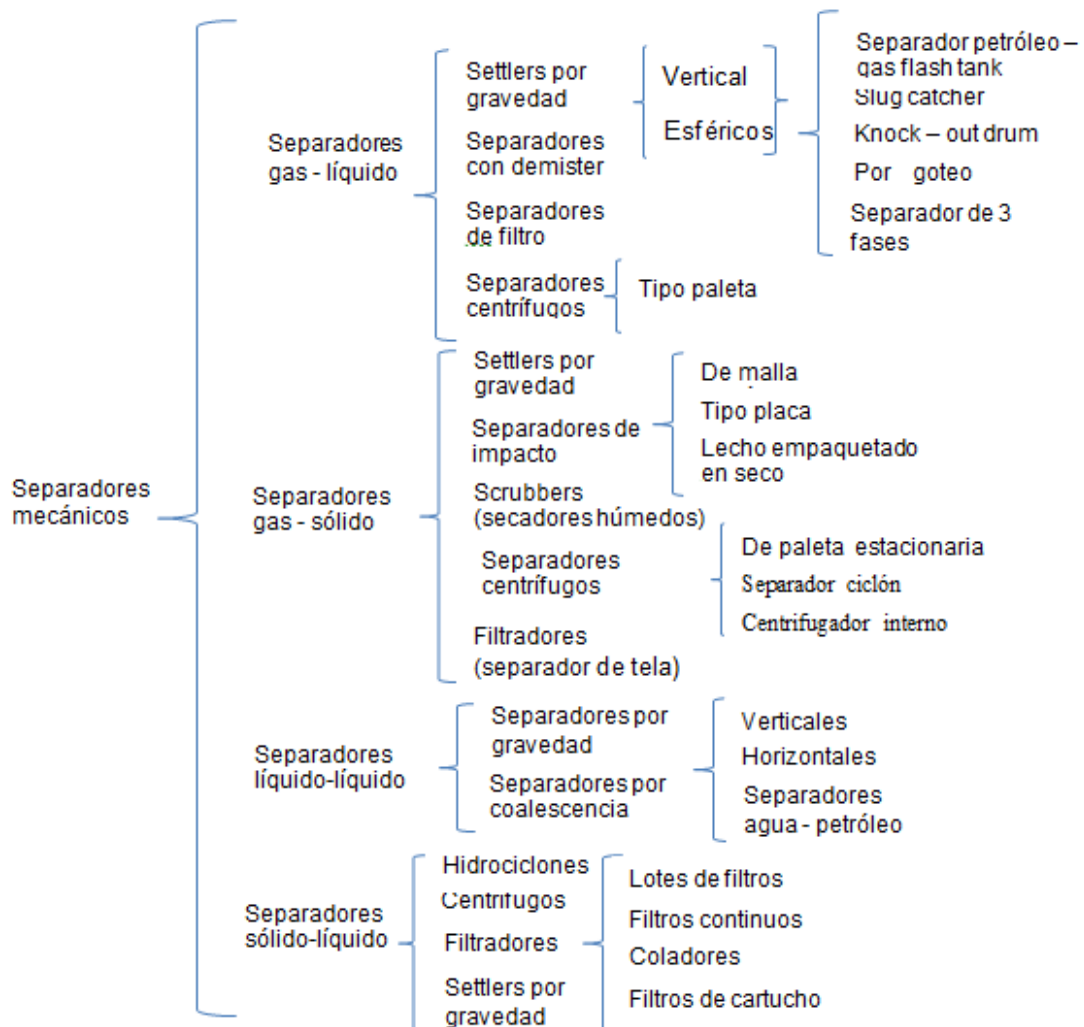
Fuente: (Bryan, 2007 pág. 23)

El funcionamiento de los separadores está basado en las distintas densidades con las que cuenta cada uno de sus componentes, esto les permite estratificarse de modo que un separador horizontal el gas se mueve lentamente por la parte alta del recipiente, el agua por el fondo y el petróleo por encima de ésta. Cualquier sólido como arena y demás se situará en el fondo del separador. Estos recipientes son normalmente

usados en la producción o cerca de las plataformas de perforación de pozos, colectores, o de tanques separadores primarios. (ARNOLD, 2008 pág. 45)

**2.2.3.1 Clasificación de los separadores.** Los separadores a menudo son clasificados por su configuración geométrica vertical, horizontal o esférica. Además por su función al separar dos y tres fases. Son de dos fases si éstos separan gas de la corriente líquida total, así como de tres si a más del gas separan la corriente líquida en petróleo y agua.

Figura 3: Tipos de separadores mecánicos



Fuente: (POE, 2006 pág. 37)

Adicionalmente, los separadores pueden ser categorizados en concordancia con su presión de operación; alta, media y baja. Los de baja trabajan entre: 0,7 y 12 bar; los de media entre: 15 y 48 bar; y los de alta entre 65 y 103 bar. Además se podrían clasificar según su aplicación: prueba, producción, baja temperatura, medición y



separadores de etapas. Por último se clasifican por sus principios de funcionamiento como: gravedad, centrifugación y coalescencia. (ARNOLD, 2008 pág. 51)

**2.2.3.2 Separadores verticales.** Un separador vertical puede manejar relativamente grandes cantidades de fluido con presencia de burbujas sin arrastrarlas por la salida del gas, esto proporciona un mejor control en las presiones de operación, es usado comúnmente en pozos con un GOR intermedio o bajo en condiciones de flujo burbujeante o con más arena de la esperada, estos separadores pueden trabajar con dos y tres fases de operación, así como variar su tamaño (diámetro y altura).

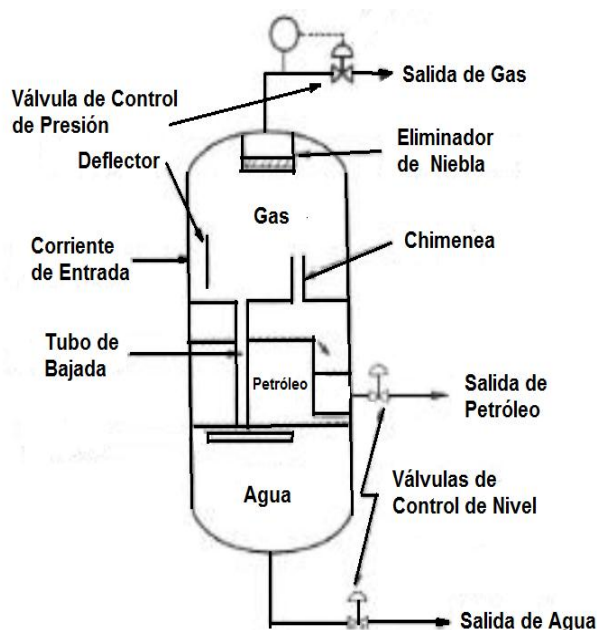
El funcionamiento se basa en que el flujo entra por una boca de ingreso como en los separadores horizontales y un deflector separa en primera instancia la fase líquida de la gaseosa por medio del impacto en el mismo, el gas se mueve hacia la parte superior usualmente pasando por un eliminador de niebla con el fin de remover las partículas líquidas en suspensión.

Dependiendo de la eficiencia del eliminador se obtendrá un fluido lo suficientemente gaseoso, se necesita de un tubo de bajada para trasladar el líquido colectado a través de la interfaz petróleo–gas, para no perturbar la acción de separación por densidad que toma lugar. Los separadores verticales deben ser construidos de tal manera que el flujo entrante se coloque cerca del tope de los niveles de líquido y pase a través de la cámara de separación, a pesar de que no son alternativas competitivas a diferencia de los separadores horizontales.

Se necesita una chimenea para igualar la presión, entre la sección inferior y la sección de gas. La salida o tubo de descenso se encuentra en la interfaz petróleo–agua, partir de este punto cualquier gota de agua atrapada en la fase de petróleo se separa. Las gotas de agua fluyen con contracorriente del petróleo. Del mismo modo el agua fluye hacia abajo y cuando las gotas de petróleo se encuentran atrapadas en esta fase, tienden a elevarse a contracorriente del flujo de agua.

Dado que el movimiento de las fases al interior del recipiente varía de acuerdo a la disposición horizontal o vertical del separador paralela o perpendicularmente. En el separador vertical, el control de nivel no es crítico, ya que el nivel de líquido puede fluctuar varios centímetros sin afectar la eficiencia operativa. Sin embargo, puede afectar a la caída de presión para el tubo descendente debido a la columna de líquido, por lo que podría afectar potencialmente a los dispositivos de drenaje. (GPS A, 1998)

Figura 4: Esquema de un separador vertical trifásico común



Fuente: (GPS A, 1998 pág. 121)

**2.2.3.3 Separadores horizontales.** Los separadores horizontales son casi siempre utilizados para pozos con un alto GOR, para flujos de pozo espumosos, y para la separación líquido-líquido. Los separadores horizontales pueden diseñarse para dos o tres fases de operación. Además de que varían en su tamaño (diámetro y distancia de la soldadura cordón a cordón del recipiente).

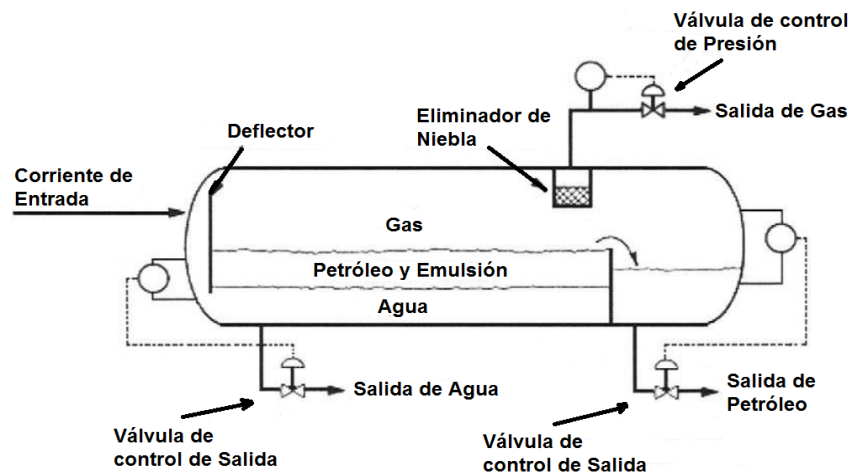
Su funcionamiento se basa en que el fluido entra al separador y golpea en el desviador o deflector. Esto cambia repentinamente la fuerza inercial con la que entró, resultando en una separación primaria del líquido y gas. En la mayoría de diseños, este deflector direcciona el fluido entrante hacia la interfaz de petróleo y agua en la parte inferior. Esto obliga a la mezcla agua-aceite entrante a mezclarse con la fase continua de agua en el fondo del recipiente y a elevarse a través de la interfaz agua-aceite. Este proceso llamado "lavado con agua" promueve la coalescencia de las gotas de agua que son arrastradas en la fase continua de aceite.

El deflector de entrada asegura que poco gas se mueva con la fase líquida, y el agua de lavado asegura que el líquido no caiga en la parte superior de la interfaz de agua-aceite, mezclando el líquido retenido en el recipiente, cabe mencionar que este hecho hace difícil la medición y control de las interfases líquidas. La sección de recolección de líquido proporciona el tiempo suficiente para que el petróleo y la emulsión formen una capa en la parte alta de los líquidos. El agua libre se asienta en el fondo y ya que

está separada fluye a través de una boca del recipiente. Un controlador de nivel de interfaz envía una señal a la válvula de descarga de agua, permitiendo así que la cantidad correcta de agua abandone el recipiente de modo que la interfaz aceite - agua se mantenga a la altura de diseño.

El gas fluye horizontalmente y pasa a través del eliminador de niebla. Existe una válvula de control que mantiene constante la presión en el recipiente. El nivel de la interfase gas-aceite puede variar de la mitad del diámetro al 75%, dependiendo de la relativa importancia de la separación gas-líquido y del propósito del que tenga el separador. (GPS A, 1998 pág. 122)

Figura 5: Esquema de un separador horizontal trifásico común



Fuente: (GPS A, 1998 pág. 125)

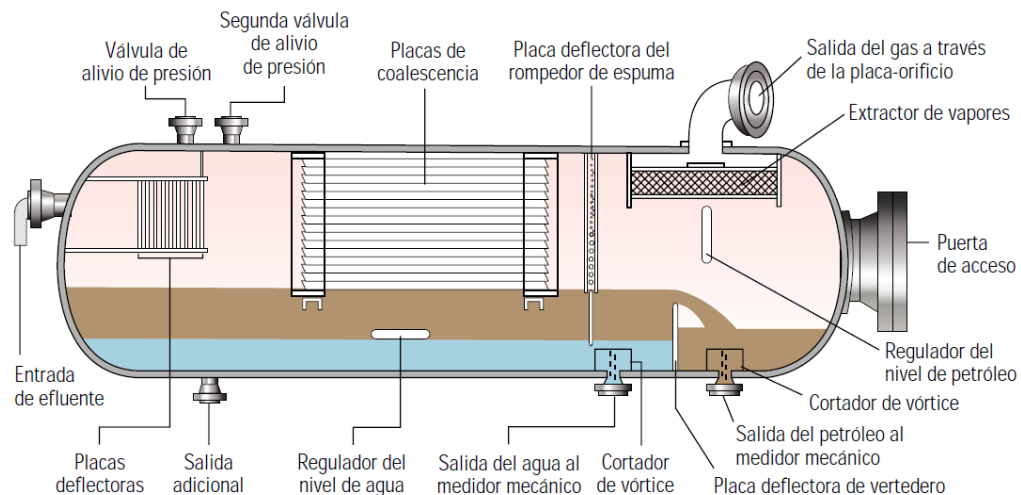
**2.2.3.4 Separadores de prueba.** Son usados para separar y detallar el flujo de pozo que proviene de uno o más de éstos. En este sentido, el comportamiento de cada pozo bajo diferentes condiciones de presión de extracción puede ser definido. Esto normalmente toma lugar cuando el pozo es destinado a la producción continua y posteriormente, a intervalos regulares de típicamente 1 o 2 meses, además medirá tasas totales de los componentes en diferentes condiciones de producción así como la determinación de elementos indeseables como la arena y otros.

Las fases separadas son analizadas en el laboratorio para determinar la composición de los hidrocarburos del petróleo y gas. Habitualmente, los separadores de prueba son recipientes cilíndricos que se despliegan en forma horizontal. Estos recipientes poseen una longitud que oscila entre 4,6 y 9,1 m, una altura que fluctúa entre 2,4 y 4 m y pesan hasta 9 072 kg. Los separadores reciben el efluente producido de los pozos

individuales y segregan las diferentes fases de fluido a través de un proceso basado en la fuerza de gravedad. Las condiciones operacionales normales para un separador de prueba se limitan a presiones que oscilan entre 1,4 y 6,9 Pa, con presiones de trabajo máximas de hasta 9,9 MPa.

Los separadores de prueba no están diseñados para pozos específicos sino que, por el contrario, deben manejar una amplia variedad de tasas de flujo o gasto. En el momento de la instalación, los separadores de prueba a menudo se sobredimensionan en forma intencional para que posteriormente sirvan como separadores auxiliares de producción, o complementarios y puedan procesar cualquier incremento de producción futuro. (Schlumberger, 2005 pág. 61)

Figura 6: Separador de prueba



Fuente: (Schlumberger, 2005 pág. 61)

**2.2.3.5 Mecanismos de separación.** La separación gas-líquido es el proceso más frecuentemente utilizado en la industria, basado en uno o la combinación de los mecanismos: Sedimentación por gravedad, impacto y centrifugación. En general los principios de separación pueden ser clasificados como de Momentum, gravedad y filtración. Siendo posible la separación solo si las sustancias a separar no son miscibles y tienen diferente densidad.

- **Separación mecánica por momentum.** Las fases de fluido con diferente densidad tendrán un momentum distinto. Si una corriente de dos fases cambia de dirección bruscamente, un mayor momentum permitirá que las partículas de la fase más pesada se separen de las ligeras, por lo general la separación por momentum es empleada para mezclas de tres fases.

- ***Separación mecánica por gravedad.*** Gotas líquidas o partículas sólidas se asientan en la fase de gas si la fuerza gravitacional que actúa sobre la gota es menor que la fuerza de arrastre del gas que fluye alrededor de ésta. El mismo fenómeno ocurre por partículas sólidas en fase líquida cuando la gota de un líquido no miscible está inmerso en otro líquido. El aumento de burbujas y gas en la fase líquida también sigue las mismas reglas debido a la fuerza gravitatoria no tan notoria. En cuanto a la sedimentación por gravedad se basa en la distribución de tamaños de partículas, así como las leyes que rigen sobre ellas.

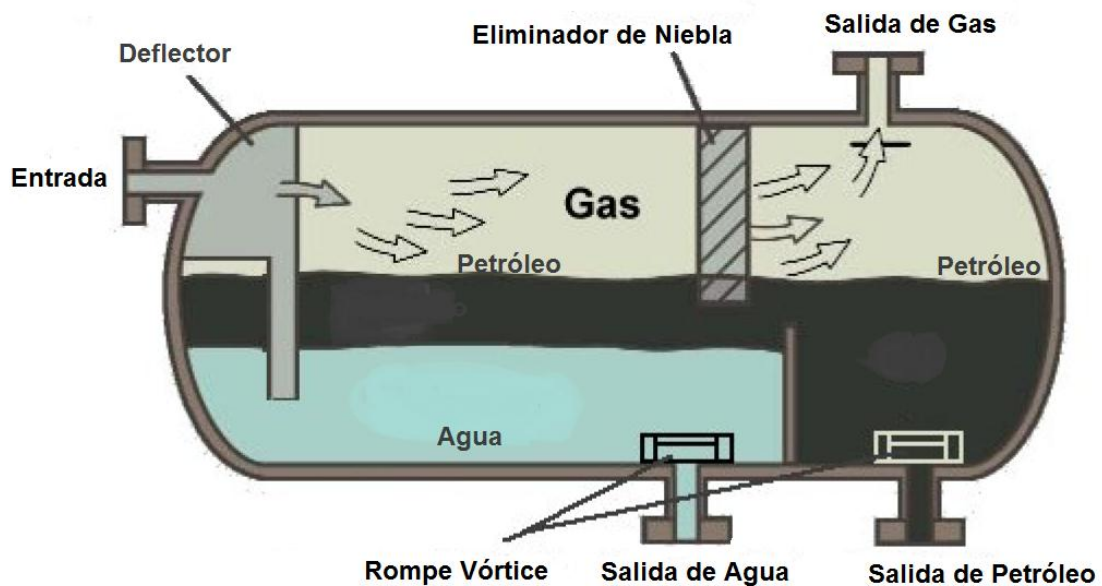
- ***Separación mecánica por filtración.*** La filtración es la separación de una mezcla de fluidos conformada por sólidos, líquidos y gas; que implica su paso a través de una barrera porosa que retiene la mayor parte de las partículas sólidas o líquidas contenidas en ella. Los procesos de filtración se pueden dividir en tres grandes categorías: total, de profundidad y superficial.

**2.2.3.6 Factores que afectan la separación.** Las características de la corriente de flujo afectan en gran medida el diseño y funcionamiento de un separador. Los siguientes factores deben ser determinados antes de su diseño:

- Las cantidades de flujo de gas y líquido (mínima, media y máxima).
- Temperaturas y presiones de operación y diseño.
- La velocidad crítica del gas
- Las tendencias de aumentar o taponar la corriente de alimentación.
- Tiempo de residencia de los fluidos al interior del recipiente.
- Propiedades físicas de los fluidos como densidad, peso molecular y demás.
- Grado de separación diseñado (remoción del 100% de las partículas mayores de 10 micrones)
- Tamaño de las partículas de líquido así como las propiedades de la mezcla.
- Tendencia a formar espuma por parte del petróleo.
- Tendencias corrosivas de líquido o gas (GPS A, 1998 pág. 126)

### 2.2.3.7 Elementos internos de un separador

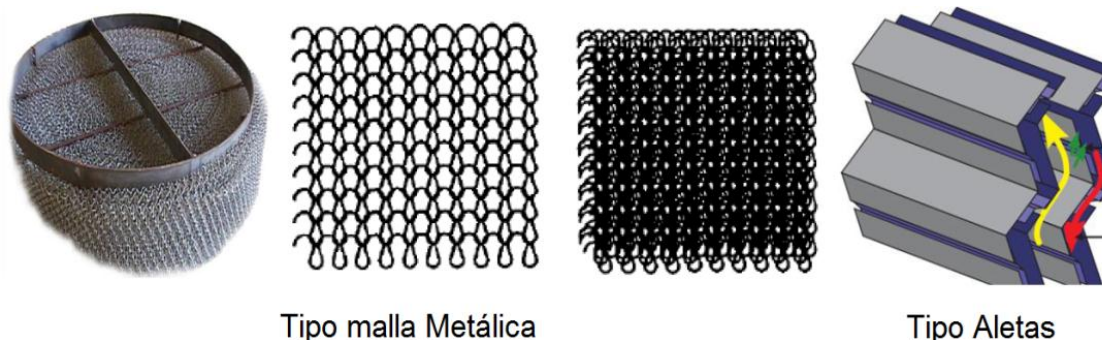
Figura 7: Componentes internos de un separador



Fuente: (ABB, 2010 pág. 39)

- **Eliminador de niebla.** Es un dispositivo usado para eliminar las posibles partículas líquidas que aún se encuentren en la fase gaseosa del separador, se presentan comúnmente compuestas de conjuntos de mallas y aletas metálicas. Su funcionamiento está basado en el impacto de las gotas de líquido en los filamentos o placas del extractor, para luego caer por gravedad a la fase líquida. De entre las dificultades comunes aparecen el óxido y las ceras parafínicas. Los eliminadores de niebla son seleccionados por medio de la velocidad del gas más crítica, con el fin de garantizar una correcta separación de esta fase.

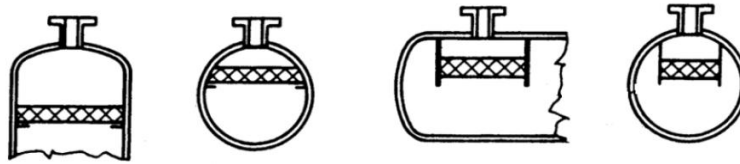
Figura 8: Tipos de eliminadores de niebla



Fuente: (Bryan, 2007 pág. 76)

## Eliminadores de niebla en separadores

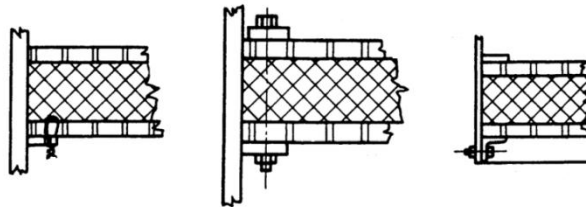
Figura 9: Ubicación de eliminadores de niebla en separadores



Fuente: (MEGYESY, 2008 pág. 318)

## Soportes para eliminadores de niebla

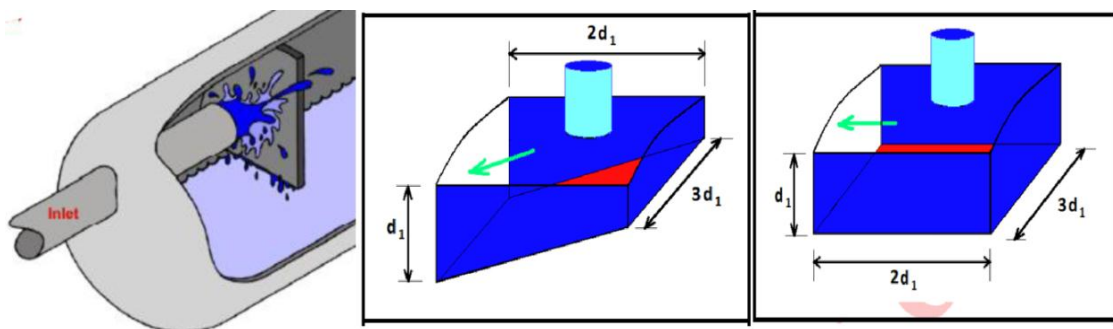
Figura 10: Tipos de soportes para eliminadores de niebla



Fuente: (MEGYESY, 2008 pág. 318)

- **Deflector.** La corriente de entrada en un separador es típicamente una mezcla turbulenta de gas y líquido a gran velocidad, lo cual genera sobre el flujo una gran inercia. El deflector tipo baffle es una placa metálica y el primer elemento de separación ya que cambia la dirección del fluido, separando la fase líquida de la gaseosa en gran medida. Además del baffle existen diversos deflectores tipo: codo de 90°, distribuidor tipo vane, angular con anillo anular, cyclone y tee ranurada; los cuales son seleccionados por medio de su eficiencia, costo y prestaciones. A continuación se presentan las dimensiones del baffle de la bota de gas:

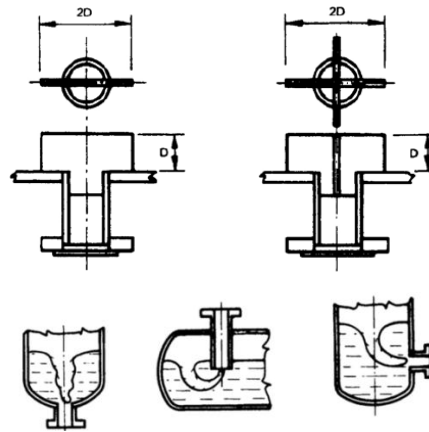
Figura 11: Deflector



Fuente: (ABB, 2010 pág. 54)

- **Rompe vórtice.** Elemento mecánico en forma de cruz o rejilla, ubicado sobre la boca de descarga de los fluidos separados con el fin de impedir la formación de vórtices, los cuales permiten la fuga de gas en la fase líquida, lo cual no es deseable.

Figura 12: Vórtices y rompe vórtices



Fuente: (MEGYESY, 2008 pág. 322)

- **Láminas rompe olas.** Se trata de láminas perforadas que amortiguan la energía hidráulica con el fin de evitar el oleaje y su posterior efecto de resonancia hidráulica en los instrumentos de nivel, además de afectar la separación por ocasionar turbulencias. Estos son utilizados generalmente en separadores horizontales.
- **Rebosadero.** Es una placa de acero que divide el volumen de separación con la cámara donde se alojará el crudo rebozado, ubicado a cierta distancia y altura dependiendo de las capacidades del separador horizontal.
- **Desarenador.** Es un arreglo especial de tubería y boquillas que permite el ingreso de una fuente de agua a una presión elevada la cual arrastra arenas y sólidos que van depositándose en el fondo del separador.

**2.2.3.8 Dispositivos de control.** Los parámetros predominantes en la operación de todo separador y que por ende se tienen que controlar son la presión al interior, niveles de fases e interfases y temperatura de los fluidos. Las propiedades físicas de los fluidos al interior del separador se ven afectadas por los cambios en los parámetros mencionados, lo cual deriva en una afectación al proceso físico de separación.

- Control de presión
- Control de nivel



- Controladores de la interfaz petróleo-agua
- Orificios para instrumentación
- Válvulas automáticas

- **Control de presión.** La presión del separador es controlada por medio de un dispositivo de presión asociado a una válvula automática, que reacciona ante cualquier variación de presión al interior. Cuando hay una disminución de presión el controlador hace que la válvula se cierre para evitar que salga más gas obteniendo un incremento en la presión, por el contrario, si la presión aumenta el controlador hace que la válvula se abra para permitir la salida de gas y disminuir así la presión.

- **Control de nivel.** El nivel de la interfaz gas-líquido se debe mantener lo más estable y constante posible dependiendo si es un separador horizontal o vertical. Una variación en este nivel cambia el volumen de gas y líquido al interior del recipiente al igual que su tiempo de retención. El punto inicial del nivel de la interfaz gas-líquido depende del GOR que tenga el pozo. Si este valor es alto se necesita disponer de más volumen para el gas, por lo tanto el nivel de líquido en el separador debe ser bajo. Si se tiene un valor de GOR bajo sería lo contrario a lo expresado anteriormente.

- **Controladores de petróleo y agua.** El controlador de petróleo por lo general consta de un flotador que actúa directamente abriendo o cerrando una válvula automática con el fin de regular su salida. El nivel de interfaz petróleo-agua debe mantenerse constante para evitar que el agua pase por encima de la placa de rebose y se mezcle nuevamente en la cámara de almacenamiento de petróleo, para controlar aquello se emplea un flotador que actúa sobre el agua o el método capacitivo.

- **Orificios para instrumentación.** El equipo debe contar con tres instrumentos básicos, transmisores de: presión, nivel de petróleo y nivel de interfase. La medición de la interfaz no es fácil y por lo general se opta por tener dos tecnologías disponibles, una de ellas es un instrumento capacitivo que mide la constante dieléctrica del petróleo y agua con una constante de 2 y 80 respectivamente. (GPS A, 1998 pág. 208)

**2.2.3.9 Etapas de separación.** La separación de petróleo y gas por etapas se realiza a través de una serie de separadores consecutivos cuyas presiones de operación, van disminuyendo gradualmente desde el pozo de extracción hasta la etapa final de separación. El fluido se descarga a partir de un separador de alta presión hasta uno de baja. El propósito de la separación por etapas es conseguir la mayor cantidad de

hidrocarburo de la corriente de pozo, y proporcionar la mayor estabilidad de los flujos de líquidos y gases.

Las presiones de operación se reducen secuencialmente, por lo tanto la presión más alta se encuentra en el primer separador y la más baja en el último. En la práctica, el número de etapas que normalmente se emplea es de entre dos y cuatro según el GOR y la presión de cada pozo. La separación de dos etapas se utiliza generalmente para pozos de bajo GOR y presión, de igual forma la separación de tres fases se utiliza en pozos con un GOR y presión entre medio y alto, y finalmente la separación de cuatro etapas se utiliza en pozos de un muy alto GOR y presión.

Las cantidades de gas y líquido recolectado a una presión dada se determinan por el cálculo de una ecuación de equilibrio apropiada para cierto estado. Esto ayuda a optimizar el valor de la presión que se establece para cada separador. Las diferencias de presiones con respecto a cada etapa son llevadas de manera constante. Por lo tanto, si se conoce la presión en el primer (que normalmente se fija por cuestiones de diseño y económicas) y último separador (que será cercana a la presión atmosférica), se podrían determinar las presiones intermedias.

**2.2.3.10 Selección de separadores.** No hay simples reglas para la selección de un separador. Algunas veces, ambas configuraciones (vertical y horizontal) deben ser evaluadas para decidir cuál es más económicamente factible. Los relativos méritos y aplicaciones comunes de los separadores verticales y horizontales se presentan a continuación:

#### **Condiciones de uso para separadores horizontales;**

- Grandes volúmenes de gas y/o líquidos.
- Para razones de Petróleo-Gas (GOR) entre altas y medias.
- Petróleo espumoso.
- Separación de tres fases.
- Petróleo propenso a formar emulsiones.

#### **Ventajas en separadores horizontales;**

- Si al analizar dos separadores vertical y horizontal de la misma capacidad de gas, el horizontal tendrá un diámetro menor.

- No hay contra flujo (el flujo de gas no se opone al del líquido).
- Cuenta con un área grande de líquido para la dispersión de espuma que generalmente reduce la turbulencia.
- Mayor estabilidad en pie debido a su baja altura.

#### **Condiciones de uso para separadores verticales;**

- En caudales pequeños de líquido.
- En razones de Petróleo-Gas (GOR) muy altas o cuando el volumen total es bajo.
- Cuando el terreno es limitado.
- Cuando se desea un fácil control de nivel.

#### **Ventajas en separadores verticales;**

- Tiene un buen drenado en el fondo del recipiente y facilidades de limpieza.
- Puede manejar más arena, parafinas, lodo y ceras sin taponamientos.
- Menos tendencia para el arrastre de partículas indeseables.
- Ocupa una pequeña área de terreno. (MANNING and Thompson, 1995)

Tabla 1. Parámetros de selección de separadores

TIPO DE SEPARADOR	% DE AGUA LIBRE	RELACIÓN GAS-PETRÓLEO
Bifásico	0 - 30	>350
Trifásico	30 – 50	100 – 250
Free Water Knock-Out	> de 50	< 100

Fuente: (BENITEZ, 2011 pág. 47)

**2.2.3.11 Problemas de operación en separadores.** Debido a la composición compleja del petróleo, el manipular esta sustancia da lugar a muchos problemas propios del proceso de separación. Es muy importante tener presente estos inconvenientes a la hora del diseño.

- **Petróleo espumoso.** La causa principal de la espuma en el petróleo es la aparición de impurezas distintas del agua, que son poco prácticas para eliminar antes de que la corriente entre al separador. La espuma no presenta ningún problema dentro

de un separador si el diseño interno asegura un tiempo adecuado o suficiente superficie de coalescencia para "romper" la espuma.

#### **Problemas que causa la espuma:**

- El control mecánico del nivel de líquido se complica porque ningún dispositivo de control debe analizar tres fases al mismo tiempo, una emulsión es la tercera fase, en lugar de solo dos fases.
- La espuma tiene un volumen grande con relación a su peso. Por lo tanto, ocupa mucho espacio en el recipiente que de otra forma, podría ser ocupado por más líquido en el colector o más secciones de sedimentación por gravedad.
- En un banco incontrolado de espuma, sería imposible evitar que el gas separado así como el petróleo no salieran del separador sin cierta cantidad de espuma.

#### ***La espuma puede ser reducida:***

- Usando un paquete antiespumante.
  - Usando químicos antiespumantes.
  - Utilizando calor para descomponerlo.
- 
- ***Parafina.*** Las placas de coalescencia en el selector de líquidos y la malla para la extracción de niebla en el selector de gas, son particularmente propensas a la obstrucción por ceras de parafina. Para dar mantenimiento, agujeros de mano y boquillas deben ser incluidos en el recipiente para permitir el vapor, solventes u otros tipos de limpieza para los elementos internos del separador. Además, la temperatura de la masa de líquido debe estar siempre por encima de las condiciones que permitan la formación de éstas ceras.
  - ***Arena.*** La arena es a menudo muy problemática en un separador por causar el recorte e incluso el taponamiento de válvulas. Cuando se acumula en el fondo provoca problemas en el control de nivel. Generalmente la arena está presente en los principales separadores de producción. Es una práctica común remover la arena de los primeros flujos del yacimiento, lo cual reduce los problemas de este agente al mínimo dando sustanciales beneficios operacionales. En la actualidad existen

efectivos dispositivos removedores de arena basados en Hidrociclones liquido-sólidos, los cuales remueven dicha arena a la entrada del separador.

- **Arrastre de gas infiltrado.** Ocurre cuando el gas libre escapa con la fase líquida dando lugar a erróneas mediciones de nivel de líquido bajo, vórtices, o fallas de control.
- **Emulsiones.** Se manifiestan como problema en la operación de separadores trifásicos. Durante un período de tiempo una acumulación de materiales emulsionados y otras inusuales impurezas se formará en la interfaz petróleo-agua; dificultando el control de nivel. Además, ésta acumulación también disminuirá el tiempo efectivo de retención de agua y petróleo en el separador, derivando en una caída de eficiencia en la separación. La adición de químicos y calor a menudo minimizan estas dificultades, también es posible bajar el tiempo de asentamiento necesario para la separación del agua y petróleo aplicando calor en la sección líquida del separador o adicionando desemulsificantes químicos. (ARNOLD, 2008)

**2.2.4 Bota de gas.** Es un separador vertical destinado a obtener las distintas fases del petróleo, siendo el gas la predominante. Según su requerimiento puede ser bifásica o trifásica. Es utilizada generalmente en la última etapa de separación del proceso de producción del petróleo, ver Anexo 1.

Figura 13: Izaje de un separador vertical

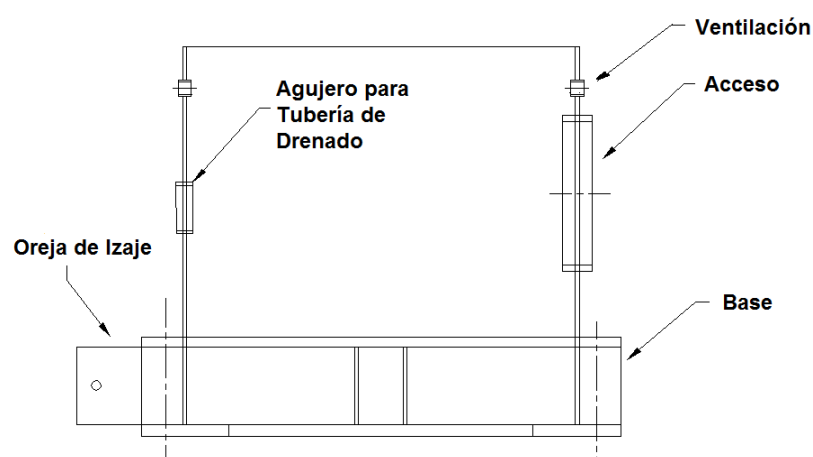


Fuente: (ESCOE, 2008 pág. 149)

**2.2.4.1 Elementos complementarios de una bota de gas.** Si bien el recipiente separa las fases del petróleo en su interior, existen diversos elementos complementarios presentes desde su transporte e instalación en planta, hasta el fin de su vida útil.

- **Name plate.** Es una pequeña placa metálica que se sitúa en un lugar visible del recipiente, su finalidad es proporcionar una serie de datos críticos del recipiente tanto constructivos como de operación. Los parámetros relacionados se detallan en el código ASME, UG-119, con los cuales se basó el name plate de la bota de gas tal como se muestra en los planos constructivos, a continuación se mencionan los parámetros comúnmente presentes: serie del tanque, nombre, año de construcción, MAWP, MDMT, peso total, RT, capacidad, constructor, datos de operación, etc.
- **Faldón.** Es un cilindro de acero en el cual se situará la parte baja de la bota de gas por medio de soldadura. Actúa como una transición entre la cámara del recipiente y el suelo además de soportar el peso total de la estructura metálica. En los Anexos 30, 31, 32 y 35 se detallan las características de las partes que lo conforman:
  - 2 agujeros de ventilación
  - Acceso
  - Placas base
  - Agujero para tubería de drenaje

Figura 14: Faldón

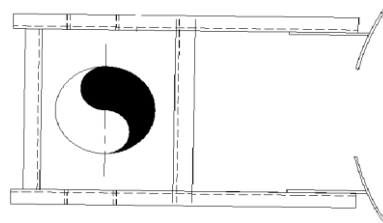


Fuente: El autor

- **Soportes.** Es una pequeña estructura metálica con una configuración destinada a estabilizar una línea de flujo exteriormente al rodearla. Generalmente se

instalan en las líneas que se encuentran en la parte alta del recipiente. Están unidas exteriormente al separador por medio de soldadura.

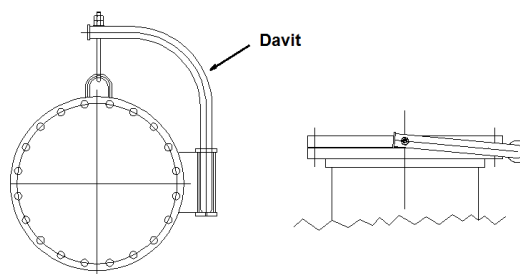
Figura 15: Soporte de línea



Fuente: El autor

- **Davit.** Es una pequeña estructura metálica acoplada exteriormente a la boca de mantenimiento o Manhole, su funcionamiento es como el de una bisagra que sostiene la brida complementaria a esta boca mientras ésta es abierta. Ya que su uso es muy común existen muchos manuales y handbooks que facilitan la geometría adecuada, según el diámetro de la boca en que se instalará, ver el Anexo 33.

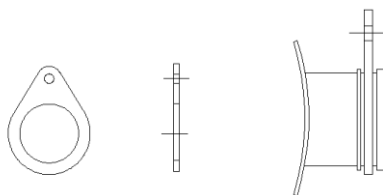
Figura 16: Boca de mantenimiento y Davit



Fuente: El autor

- **Trunnion.** Es un elemento metálico que consta de una placa que gira libre sobre un tubo soldado exteriormente al cuerpo del separador. Se ubica en un lugar determinado según el centroide de todo el recipiente complementando a la oreja de izaje, con el fin de facilitar la instalación y transporte del recipiente en su lugar de operación. Generalmente se instalan dos trunnion con una separación de 180°.

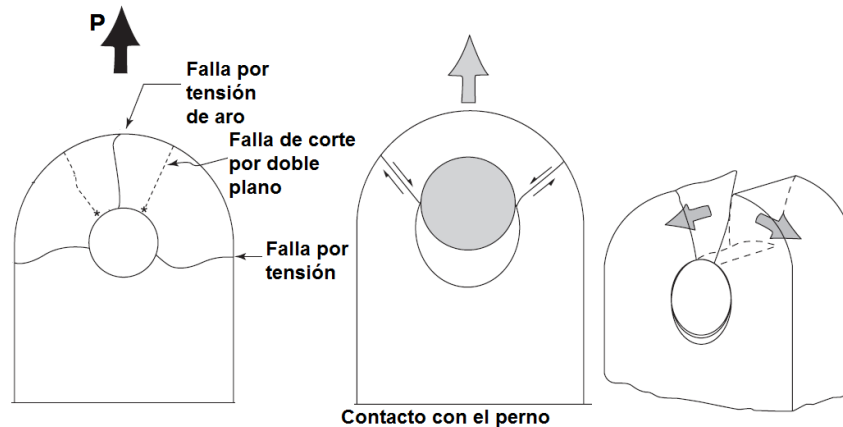
Figura 17: Trunnion



Fuente: El autor

- **Oreja de izaje.** Es una placa de acero de forma rectangular con un agujero en su extremo. Instalada en la base del faldón, es un apoyo complementario a los dos Trunnion de la parte superior que facilitarán por medio de grúas el traslado seguro e instalación final del recipiente. Debido a las cargas variables durante el izaje, su diseño y verificación de soldadura son fundamentales, de lo contrario estaría propensa a fallar.

Figura 18: Fallas comunes en orejas de izaje



Fuente: (ESCOE, 2008 pág. 124)

- **Anillo de refuerzo.** Debido a la disposición vertical del separador y que la presión externa suele ser predominante en el diseño de los anillos que conforman el cuerpo, la bota de gas está expuesta a pandeo. El anillo de refuerzo es una placa circular de acero que actúa a modo de arriostramiento, reduciendo así la posibilidad de que este fenómeno ocurra. Se ubica en el centro de gravedad de la cápsula del recipiente. UG -29.

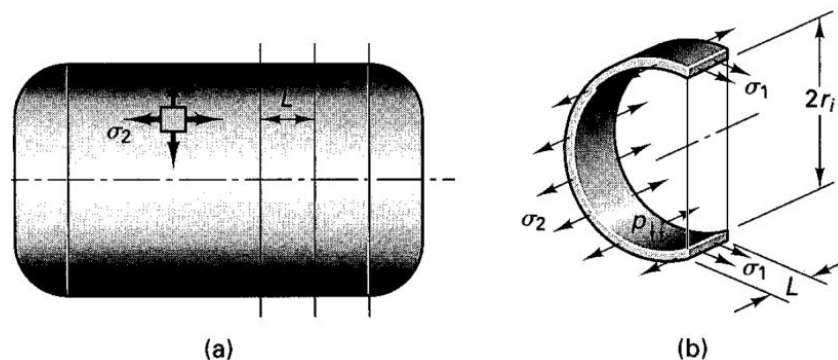
**2.2.4.2 Aspectos de diseño.** Para el diseño, fabricación y construcción de recipientes con presiones en el rango que trabaja una bota de gas, la mayoría de fabricantes se rige a la norma ASME sección VIII subdivisión 1 y 2, donde se especifica cada uno de los factores de diseño para ciertos elementos del recipiente como: anillos de refuerzo, cilindros del cuerpo, cabezas y bocas. Los procedimientos de diseño para los elementos complementarios del recipiente deberán ser tomados de manuales o handbooks alternativos.

- **Presión de operación.** Es la presión manométrica requerida por el proceso, presión a la cual el recipiente es normalmente operado.



- **Presión de diseño.** Es una presión fijada por encima de la de operación con el fin de garantizar la capacidad del recipiente, normalmente con 30 psi o con un 10% más que la de operación (UG-21).
- **Presión de trabajo máxima admisible.** Es la presión máxima de trabajo que puede soportar un material sin fallar. En un recipiente a presión el elemento que presente la menor MAWP será el más crítico, posicionándose así como la presión de la cámara del recipiente debido a que es el punto más débil (UG-98).
- **Esfuerzos.** El cuerpo de un recipiente a presión de evolvente cilíndrica bajo cargas internas y externas presenta dos tipos de esfuerzos. Son longitudinales debido a juntas circunferenciales ( $\sigma_2$ ) y circunferenciales debido a juntas longitudinales ( $\sigma_1$ ). Siendo el esfuerzo circunferencial el gobernante en razón de dos a uno con el longitudinal debido a la configuración misma del cilindro vertical.

Figura 19: Disposición de esfuerzos en el cuerpo de un recipiente a presión



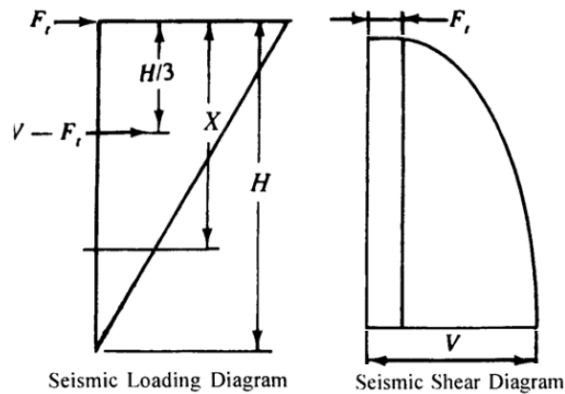
Fuente: (POPOV, 2000 pág. 184)

- **Peso del recipiente.** Es el resultado de sumar el peso de cada uno de los elementos constitutivos del separador, cálculo posteriormente utilizado en el diseño de los elementos de izaje, faldón, cargas de viento y sismo. Cabe mencionar que este peso global no es constante en el tiempo, debido a la corrosión que se presentará así como el peso del fluido en su interior. Generalmente los pesos a utilizar son en las siguientes condiciones:

- Operando y corroído
- Operando y nuevo
- Vacío y corroído
- Vacío y nuevo

- **Carga de sismo.** Es producida por el total de las fuerzas cortantes laterales provenientes del subsuelo aplicado sobre la base del recipiente, la cual genera momentos a lo largo del separador siendo el de su base el más crítico. De entre los factores que determinan esta carga están: tipo de suelo, zona sísmica, altura y forma del recipiente. Para la obtención de esta carga se utilizará la NEC 2014.

Figura 20: Disposición de cargas sobre el cuerpo de un recipiente a presión



Fuente: (MEGYESY, 2008 pág. 62)

- **MDMT.** Es la mínima temperatura media del metal considerando la temperatura de operación más baja UG-20(b). El MDMT de un elemento está directamente relacionado con su MAWP. Se la calcula en cada componente del recipiente siendo la más alta la MDMT global, que a su vez irá en la placa informativa del recipiente. Se utilizarán los Anexos del 49 al 53.
- **Carga de viento.** Es la presión que el viento aplica sobre cierta área del recipiente la cual tiende a crear un momento en su base. Dependiendo de la zona en que se instalará el recipiente, altura y obstáculos que impiden el paso del viento ésta presión variará, de ahí la importancia de su cálculo en el diseño de la bota de gas. Para la obtención de esta carga se utilizará la UBC 97.
- **Deflexión.** Es el desplazamiento relativo del cuerpo del recipiente causado por las cargas de viento y sismo, se lo calcula utilizando fórmulas de vigas en cantiléver o para un mayor detalle softwares pertinentes. Los recipientes verticales deben ser diseñados con una deflexión no mayor a 6 pulgadas por cada 100 pies de alto.
- **Tenacidad.** Es la capacidad de un material de ser usado a baja temperatura (MDMT) y con cargas de diseño normales (MAWP) sin riesgo de una fractura rápida.

La tenacidad se verifica por ensayo y está en función de: temperatura, espesor y nivel de cargas que soporta.

- **Sobre espesor por corrosión.** Los recipientes o partes de recipientes están sujetos a pérdidas de sección por corrosión, erosión o abrasión mecánica, para que la vida útil del recipiente sea la mayor posible es necesario proveerlo de un espesor extra, basado en su tiempo estimado de servicio 1/16 in de espesor equivale a 12 años por concepto de corrosión, concluyendo que 1/8 in resulta satisfactorio, UG-25.
- **Bocas.** La determinación del MAWP, MAP y MAEP; es fundamental para su diseño, no obstante el cálculo del MAWP se complica debido a que no tiene una fórmula única y está sujeto a limitaciones como: área disponible de refuerzo, espesor mínimo del cuello de boca, dimensiones mínimas de soldadura, requisitos de resistencia del cordón de soldadura, calificación de la brida adjunta, si en la boca hay cargas externas (WRC 107), si según el Apéndice 1-7-(b) de la norma ASME es una gran apertura, calificación del MDMT local, espesor del cuerpo al que se adherirá la boca y probablemente muchos criterios más.

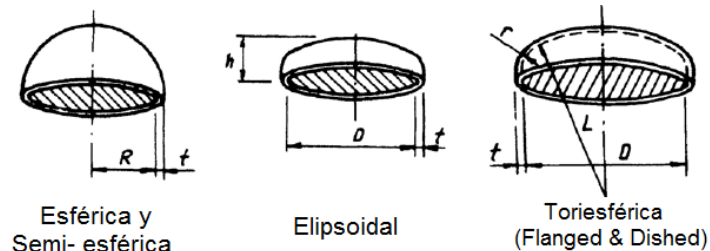
Todas estas limitaciones deben cumplirse para su determinación, y debido a que generalmente no tienen relación entre si es imposible definir un sistema algebraico de ecuaciones para hallar el MAWP de una boca específica. En su lugar, cada requerimiento del código deberá ser comprobado para cada posible MAWP "candidato", es decir una iteración. Sin embargo el uso de software hace que el trabajo de encontrar dicha presión se facilite; a mano sería muy laborioso y no práctico. El MAWP mínimo calculado será el de todo el recipiente, (UG-36).

#### **2.2.4.3 Aspectos constructivos de una bota de gas**

- **Material.** Debido a que una bota de gas trabaja bajo presiones y temperaturas altas, normalmente elementos como anillos del cuerpo, cabezas y faldón son fabricados en acero al carbono o de baja aleación SA-516-70 por su bajo costo y gran utilidad (UG-4), además existen componentes vitales de otros materiales como las tuberías destinadas a bocas en acero SA-106 B, así como los soportes para el extractor de niebla en acero inoxidable 304. Es claro que se requiere de una correcta selección de electrodos para el acople del conjunto, (Anexo 7).

- **Tipos de cabezas.** Al ser la bota de gas un recipiente a presión consta de un cuerpo y cabezas soldadas en sus extremos, las cuales son seleccionadas bajo un criterio económico y de diseño, tal como se indica en el Anexo 6. Los tipos de cabezas más utilizados se describen en el siguiente gráfico, (UG-32).

Figura 21: Tipos de cabezas en recipientes a presión



Fuente: (MEGYESY, 2008 pág. 18)

- **Preparación de superficie.** El requisito primario para un trabajo de pintura satisfactorio es remover: cascarilla de laminación, restos de pintura, óxido, suciedad, grasa, aceite y materiales extraños. Dicha cascarilla en un material es de color gris azulado, capa gruesa de óxidos de hierro que se forma sobre el acero estructural posterior a la operación de laminación en caliente; si está intacta y se adhiere firmemente al metal proporciona protección al acero, sin embargo, debido a la rodadura y la inclinación lateral de las placas en la práctica rara vez se encuentra intacta.

Si la cascarilla de laminación no está muy agrietada una imprimación de taller le dará larga vida en ambientes templados. Como resultado de esta preparación la pintura presentará una mejor adhesión a las paredes del recipiente. En el país y en latinoamérica en general se utiliza la norma SSPC, la cual clasifica al material a preparar en las categorías de herrumbre: A, B, C y D, para luego seleccionar el grado de preparación por granallado (pequeñas esferas de acero o granalla) o Sandblasting (chorro de arena). El método a utilizar en el presente proyecto es: SSPC-SP10 recomendado para superficies exteriores.

- Grado SSPC SP7, granallado / arenado rápido
- Grado SSPC SP6, granallado / arenado comercial
- Grado SSPC SP10, granallado / arenado cercano a metal
- Grado SSPC SP5, granallado / arenado a metal blanco

Tabla 2. Normas y grados de preparación de superficie

SIS	AMERICANA	SSPC	FRANCESA	INGLESA	NACE
SA 3	Metal blanco	SP 5	DS 3	1st Quality	Nace 1
SA 2 ½	Semi blanco	SP 10	DS 2.5	2nd Quality	Nace 2
SA 2	Comercial	SP 6	DS 2	3rd Quality	Nace 3
SA 1	Cepillado, granallado ligero	SP 7	DS 1		Nace 4

Fuente: (ABB, 2010 pág. 123)

- **Pintura.** Su principal propósito en un recipiente es la preservación de la superficie de acero, además de retardar la corrosión previniendo el contacto de agentes corrosivos con la superficie. La pintura impide la formación de óxido en la superficie gracias a sus propiedades inhibidoras, está destinada generalmente a resistir los efectos del medio ambiente, calor, impacto abrasivo y acción de químicos. Por lo general y según el nivel de protección que se desee, se emplean tres capas de pintura.

- Zing inorgánico (primera)
- Epóxico (segunda)
- Poliuretano (tercera)

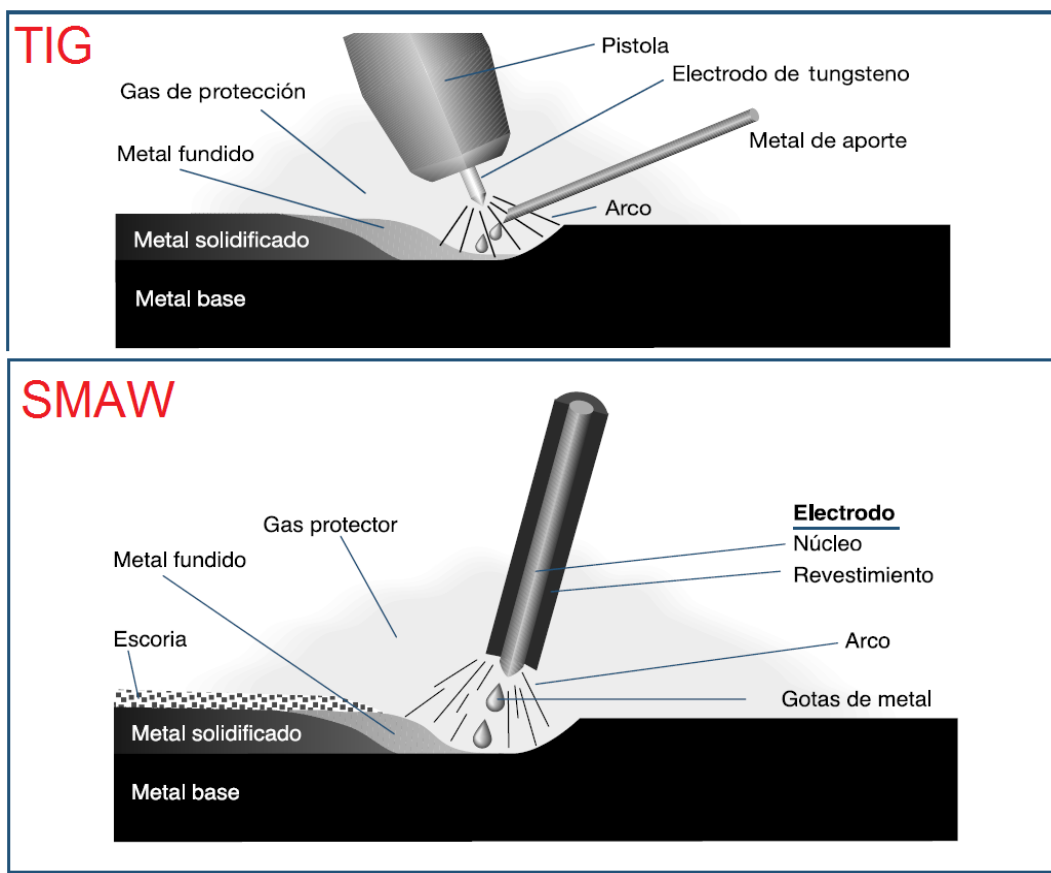
- **Soldadura.** En el aspecto de diseño del recipiente es necesario conocer la eficiencia de la soldadura en función de su tipo de junta, ubicación y condición, (Anexo 46). La soldadura es un aspecto crítico en cada uno de los elementos del recipiente, por esta razón es necesario verificar su resistencia como en el cálculo del MDMT o recomendaciones de la AWS.

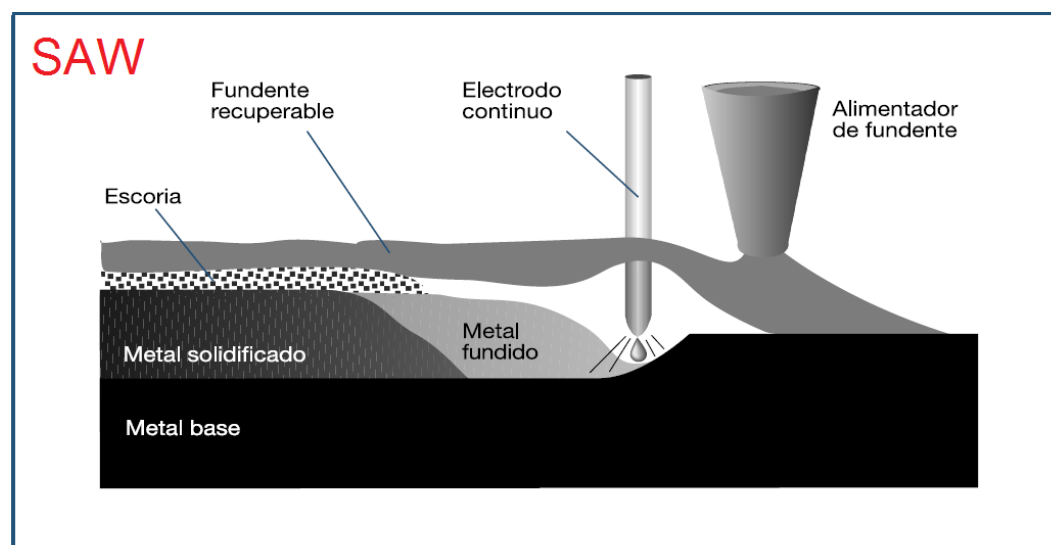
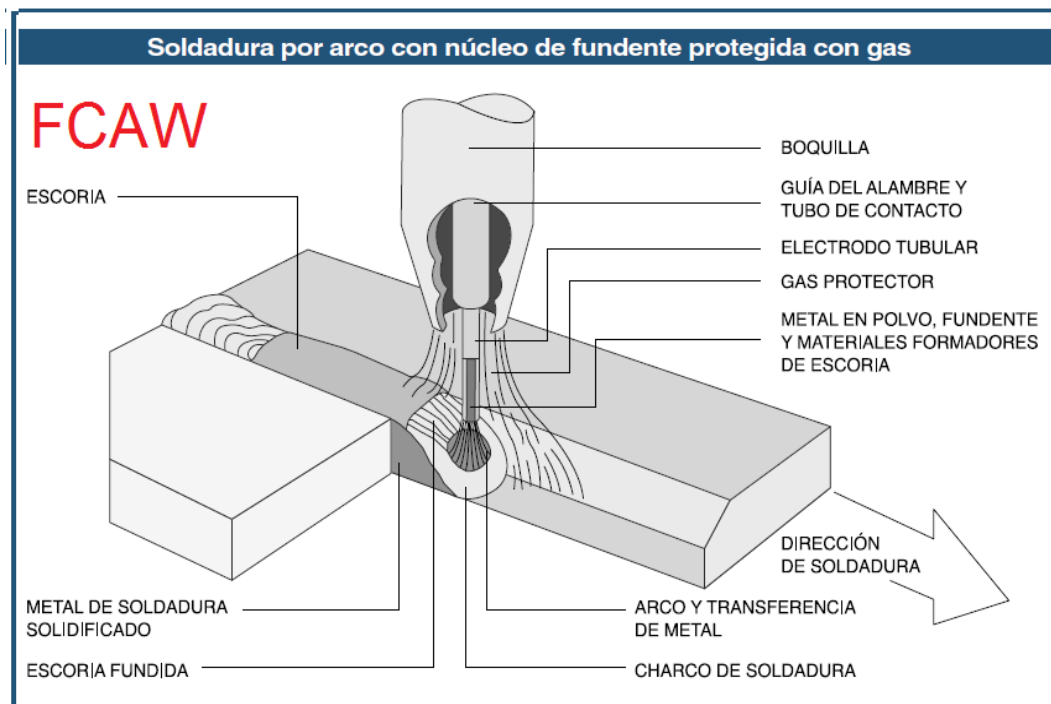
En el aspecto constructivo es vital la correcta selección de electrodos y métodos de soldadura según los materiales a soldar, así como la condición de junta ya sea de cierre (SAW), cordón de raíz (TIG), relleno (SMAW y FCAW), etc. Adicionalmente se deberá contar con sus respectivos WPS, PQR y WPQ; siempre en un marco de ahorro económico, (Ver Anexos 9, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43).

- **SAW.** Proceso en el cual un alambre desnudo es alimentado hacia la pieza, mientras el arco se mantiene sumergido en una masa de fundente provisto desde una tolva que se desplaza por delante del electrodo. Para la bota de gas se lo empleará en soldaduras de raíz. Según las condiciones de soldadura se utilizará el electrodo ER-70S-6.

- **FCAW.** Soldadura de arco con núcleo de fundente, conocida como MIG tubular, es un proceso de soldadura que aprovecha el arco eléctrico entre un electrodo continuo de metal de aporte y el metal base. Este proceso emplea un fundente que va al interior del alambre conocido como tubular, sin embargo de igual forma puede ir con o sin ayuda de una protección externa gaseosa. Según las condiciones de soldadura se utilizará el electrodo E-71T-1.
- **TIG.** Sistema de soldadura al arco con protección gaseosa, que utiliza el intenso calor de un arco eléctrico generado entre un electrodo de tungsteno no consumible y la pieza a soldar, donde puede o no utilizarse metal de aporte. Según las condiciones de soldadura se utilizará el electrodo ER-70S-6.
- **SMAW.** Proceso en que se unen dos metales mediante una fusión localizada, producida por un arco eléctrico entre un electrodo metálico y el metal base que se desea unir. Según las condiciones de soldadura se utilizará el electrodo E-7018 y E-310-16 (soldadura soporte de mist extractor y cuerpo).

Figura 22. Tipos de soldadura





Fuente: (INDURA, 2007 pág. 121)

- Examinación de juntas soldadas.** Son ensayos no destructivos destinados a buscar imperfecciones y garantizar la calidad y resistencia de las soldaduras. Los más utilizados son el ultrasonido y la radiografía, ésta última se realiza según los requerimientos del código ASME en (UW-11) y la economía del diseño. Para el caso específico de la bota de gas el análisis será: full en los cordones de soldadura longitudinales, así como spot en los circunferenciales y en las transiciones cuerpo-cabeza. Sabiendo que la mínima longitud de película radiográfica para el análisis spot es de 6 in, (Anexo 46)

- **Prueba hidrostática.** Es la forma en que los recipientes a presión son probados con el fin de garantizar su resistencia y detectar fallas, bajo estándares de seguridad y durabilidad. Consiste en llenar el recipiente con un líquido, generalmente agua tinturada para facilitar la ubicación de fugas; además de someterlo a una presión específica.

La resistencia se prueba por medio de la medición de deformaciones temporales o permanentes. En ensayo se rige según el código ASME, UG-99.



## **CAPÍTULO III**

### **3. DISEÑO DE UNA BOTA DE GAS**

#### **3.1 Diseño conceptual**

Un sistema de producción de petróleo está compuesto por un número determinado de dispositivos, los cuales son diseñados y seleccionados bajo criterios inherentes a su función. Es por ello que las condiciones de operación en cada etapa del proceso como: presión, temperatura, caudal, densidad de las fases y demás, son el requisito fundamental y el punto de partida para un correcto diseño.

Una bota de gas generalmente se sitúa después de un separador trifásico y antes de un tanque de lavado, con la finalidad de separar las fases gaseosa y líquida, siendo esta última la mezcla de petróleo y una pequeña cantidad de agua la cual es drenada por la boca inferior del recipiente, a pesar de la poca presencia de agua la bota de gas es considerada como un separador bifásico solamente. La ubicación del recipiente en el proceso proporciona las condiciones de operación del fluido que entrará al recipiente, y según su eficiencia, las condiciones de salida.

El diseño de una bota de gas está basado en dos procedimientos muy bien marcados e interrelacionados. El primero es el dimensionamiento hidráulico que consiste en determinar principalmente la altura total del recipiente, los diámetros en bocas y el diámetro interior. El segundo es el diseño mecánico basado en la norma (ASME, 2013), Sección VIII, Div 1; para determinar: los anillos que conformarán el cuerpo, cabezas, bocas, anillo de refuerzo, especificaciones de soldadura, sobreespesores por corrosión, aspectos geométricos, etc. Además existen elementos externos a la cápsula de separación no menos importantes, los cuales se diseñan con la misma rigurosidad.

#### **3.2 Procedimiento de dimensionamiento hidráulico de una bota de gas**

Antes de iniciar el análisis es importante tener presente ciertos criterios y definiciones. Holdup: es definido como el tiempo que toma la reducción del nivel de líquido desde normal (NLL) hasta vacío (LLL), mientras se mantiene un flujo de salida constante sin que ingrese fluido al mismo. Surge: es definido como el tiempo que le toma al nivel de líquido subir desde normal (NLL) hasta el máximo (HLL), mientras se mantiene el flujo

de ingreso constante sin que salga fluido del mismo. El tiempo Holdup es basado en la reserva requerida para mantener un buen control y una operación segura para las instalaciones aguas abajo. El tiempo de Surge es usualmente basado en los requerimientos para acumular líquido como resultado de las variaciones o trastornos aguas arriba o aguas abajo, (Anexo 2). El marco teórico está definido por (SVRCEK, 1993) y (SVRCEK, 1994)

Los datos en los cuales se basará el diseño hidráulico se describen en la siguiente tabla:

Tabla 3. Datos de operación para el diseño de la bota de gas

<b>Q<sub>g</sub> (MMscfd)</b>	2,20
<b>Q<sub>L</sub> (BPD)</b>	26 500
<b>P (psig)</b>	23
<b>T (°F)</b>	120
<b>d<sub>m</sub> (micrones)</b>	155
<b>ρ<sub>L</sub> (lb/ft<sup>3</sup>)</b>	54,62
<b>PM</b>	31,77
<b>API (°API)</b>	25,80
<b>μ<sub>g</sub> (Cp)</b>	0,0121
<b>ρ<sub>G</sub> (lb/ft<sup>3</sup>)</b>	0,110
<b>Z</b>	0,994

Fuente: (MOSQUERA, 2010 pág. 130)

### 3.2.1 Velocidad terminal de vapor:

Debido a que existirá eliminador de niebla y a la presión de operación, K = 0,35. Valor obtenido del Anexo 3.

$$U_T = K \left( \frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$= 0,35 \left( \frac{54,62 - 0,11}{0,11} \right)^{1/2} = 7,79 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Para un diseño conservador se tiene que:

$$U_V = 0,75 U_T \quad (2)$$

$$= 0,75(7,79) = 5,84 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Dónde;

$U_T$  = Velocidad terminal, en ft/s.

$\rho_L$  = Densidad del líquido, en lb/ft<sup>3</sup>.

$\rho_V$  = Densidad del gas, en lb/ft<sup>3</sup>.

$K$  = Constante.

$U_V$  = Velocidad del vapor, en ft/s.

### 3.2.2 Caudal volumétrico de vapor:

Es necesario transformar el caudal del gas de MMscfd a lb/h, para ello se conoce que 1mol = 379,5 scf.

$$W_V = \frac{(2\,200\,000\text{ scf})(31,77\text{ lb})(1\text{ mol})(1\text{ dia})}{(379,5\text{ scf})(\text{dia})(\text{mol})(24\text{ h})} = 7\,673,91 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$Q_V = \frac{W_V}{(3\,600)(\rho_V)} \quad (3)$$

$$= \frac{7673,91}{(3\,600)(0,11)} = 19,38 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

Dónde;

$Q_V$  = Caudal volumétrico de vapor, en ft<sup>3</sup>/s.

$W_V$  = Flujo másico del vapor, en lb/h.

### 3.2.3 Diámetro interno mínimo del recipiente:

$$D_{VD} = \left( \frac{4Q_V}{\pi U_V} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$= \left( \frac{4(19,38)}{\pi(5,84)} \right)^{1/2} = 2,05\text{ ft}$$

Dónde:

$D_{VD}$  = Diámetro interno mínimo del recipiente, en ft.

$\pi$  = Constante.

Dado el requerimiento de diseño inicial de 5 000 gls de capacidad bruta del recipiente, y que de entre las dos fases existentes, la líquida es gobernante, se seguirán las recomendaciones de la norma (API, 2008), especificación 12j, para encontrar el diámetro y altura ideales en las condiciones dadas como se muestra a continuación:

- **Velocidad superficial máxima admisible del gas.** Se utiliza la misma ecuación de Saunders – Brown descrita anteriormente:

$$U_T = 7,79 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

- **Tasa actual del volumen de gas.**

$$V_g = \frac{(2\,200\,000 \text{ scf})(31,77 \text{ lb})(1 \text{ mol})(1 \text{ dia})(\text{ft}^3)}{(379,5 \text{ scf})(\text{dia})(\text{mol})(86\,400 \text{ s})(0,11 \text{ lb})} = 19,38 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

- **Área de flujo mínima para el gas.**

$$A_m = \frac{V_g}{U_T} \quad (5)$$

$$= \frac{19,38 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{7,79 \frac{\text{ft}}{\text{s}}} = 2,49 \text{ ft}^2$$

- **Diámetro interno mínimo del separador.**

$$DI = \sqrt{\frac{144A_m}{0,7854}} \quad (6)$$

$$= \sqrt{\frac{(2,49)(144)}{0,7854}} = 21,35 \text{ in}$$

- **Volumen de líquido (sin incluir cabezas).** Según la norma API para su cálculo se recomienda asumir una altura tentativa, y el 30% del volumen excluyendo las cabezas del recipiente. Dado que el presente proyecto requiere un volumen

específico, al seleccionar un diámetro comercial y tipo de cabeza, se puede determinar la altura conveniente.

Para la selección del diámetro se primaron los requerimientos del recipiente; en primera instancia que el diámetro a elegir sea mayor que el diámetro mínimo del gas recomendado para que se garantice la separación de las fases; la segunda es que dicho diámetro permita alcanzar la capacidad requerida de 5 000 gls derivando en una altura del recipiente constructiva, armónica y económicamente viable. De existir limitaciones de espacio en el lugar donde se instalará el recipiente así como su transporte, el diámetro podría reajustarse.

Uno de los diámetros comerciales que cumple con los anteriores requerimientos fue de  $Di = 60$  in. Posteriormente se calculó el volumen de líquido al interior de la cabeza con la finalidad de encontrar la altura exacta del cuerpo del recipiente. Para la selección del tipo de cabeza se utilizó el Anexo 6, además de un espesor tentativo  $t = 0,5$  in, y para su clase el criterio de menor concentración de esfuerzos en la transición cabeza - cuerpo. Arrojando los siguientes resultados:

Figura 23: Geometría de cabeza



Fuente: El autor

Tabla 4: Geometría de cabeza

Flanged & Dished (Deep Dished Heads)	Descripción	Fórmula	Valor
	Radio de corona	$R = 0.8ID$	48 in
	Radio de nudillo	$r = 0,154ID$	9,6 in
	Sección recta	$SF_2 = 3t$	1,5 in
		$SF_1 = 3,33t$	1,665 in
	Altura total sin SF	$h = 0,255ID$	15,3 in
	Capacidad volumétrica	Software	141,89 gls

Fuente: (VERTEX, 2010)

Dónde:

$$5\,000\text{ gls} = 2V_{Ca} + V_{Cu}$$

$$V_{Cu} = 4\,716,22 \text{ gls} = \frac{\pi(DI)^2 L}{4}$$

$$L = 32,11 \text{ ft}$$

Entonces:

$$V = \frac{\pi(DI)^2 (0,3L)}{4} \quad (7)$$

$$= \frac{(60^2)(0,7854 \text{ in}^2)(9,63 \text{ ft})(\text{ft}^2)(\text{bbl})}{(144 \text{ in}^2)(5,615 \text{ ft}^3)} = 33,67 \text{ bbl}$$

- **Capacidad líquida del separador.** La norma API recomienda para petróleos entre 20 y 30(°API) se utilice de 1 a 2 minutos de retención, se tomó 1,8 min.

$$W = \frac{1\,440V}{t} \quad (8)$$

$$= \frac{1440(33,67)}{1,8} = 26\,936 \text{ BPD}$$

La capacidad líquida es satisfactoria para un diseño basado en 60in de diámetro interno por 32.11ft de altura del cuerpo.

Dónde;

$V_g$  = Tasa actual de volumen de gas, en  $\text{ft}^3/\text{s}$ .

$A_m$  = Área de flujo mínima para el gas, en  $\text{ft}^2$ .

$DI$  = Diámetro interno mínimo para el gas, en in.

$V_{Ca}$  = Volumen de cabeza, en gls.

$V_{Cu}$  = Volumen de cuerpo, en gls.

$L$  = Altura del cuerpo cilíndrico, en ft.

$V$  = Volumen de líquido, en bbls.

$W$  = Capacidad del separador, en BPD.

$t$  = Tiempo de retención del líquido, en min.

### 3.2.4 Caudal volumétrico del líquido:

$$W_L = \frac{(26\,500 \text{ bbl})(5,61 \text{ ft}^3)(1 \text{ dia})(54,62 \text{ lb})}{(\text{dia})(24 \text{ h})(1 \text{ bbl})(\text{ft}^3)} = 338\,336,76 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$Q_L = \frac{W_L}{(3\,600)(\rho_L)} \quad (9)$$

$$= \frac{338\,336,76 \frac{\text{lb}}{\text{h}}}{(3\,600)(54,62 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3})} = 1,72 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

Dónde;

$Q_L$  = Caudal volumétrico del líquido, en  $\text{ft}^3/\text{s}$ .

$W_L$  = Flujo másico del líquido, en  $\text{lb}/\text{h}$ .

**3.2.5 Dimensiones requeridas para el extractor de niebla.** Si existe un mis eliminator, se tomará 6 in para su soporte y 1 ft desde el tope del mist eliminator hasta la línea tangente en el tope del recipiente.

$$H_{ME} = 1,5 \text{ ft}$$

**3.2.6 Altura de reducción.** Medida desde la línea del eje axial de la boca de ingreso de fluido al recipiente hasta:

- La línea tangente en el tope del recipiente si no existe mist eliminator.
- El fondo del mist eliminator.

$$H_D = 0,5D_V \quad (10)$$

$$H_D = 36 + \frac{1}{2d_N} \quad (11)$$

$$H_D = 24 + \frac{1}{2d_N} \quad (12)$$

Se tomará el menor valor de entre las tres ecuaciones, entonces:

$$H_D = 0,5D_V = 0,5(5) = 2,5 \text{ ft}$$

Dónde;

$H_D$  = Altura del reducción, en in.

**3.2.7** *Altura desde el nivel alto de líquido hasta la línea del eje axial de la boca de entrada:*

$$\lambda = \frac{Q_L}{Q_L + Q_V} \quad (13)$$

$$= \frac{1,72 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{(1,72 + 19,38) \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}} = 0,08$$

$$\rho_m = \rho_L \lambda + \rho_V (1 - \lambda) \quad (14)$$

$$= (54,62)(0,08) + (0,11)(1 - 0,08) = 4,56 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

$$Q_m = Q_L + Q_V \quad (15)$$

$$= 1,72 + 19,38 = 21,1 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

$$d_N \geq \left( \frac{4Q_m \sqrt{\rho_m}}{\pi 60} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$= \left( \frac{4(21,1)}{\pi 60 / \sqrt{(4,56)}} \right)^{1/2} = 11,7 \text{ in}$$

Se tomará el diámetro comercial de 12 in

$$H_{LIN} = 12 + d_N \quad \text{Con deflector (Baffle)} \quad (17)$$

$$H_{LIN} = 12 + \frac{1}{2d_N} \quad \text{Sin deflector (Baffle)} \quad (18)$$



Entonces:

$$H_{LIN} = 12 + d_N = 12 + 12 = 24 \text{ in. Se tomará } 2,5 \text{ ft}$$

Dónde;

$H_{LIN}$  = Altura del el nivel alto de líquido hasta la boca de entrada, en in.

$d_N$  = Diámetro de boca, en in.

$\rho_m$  = Densidad del fluido que ingresa al recipiente, en lb/ft<sup>3</sup>.

$Q_m$  = Caudal volumétrico del fluido que ingresa al recipiente, en ft<sup>3</sup>/min.

Generalmente para el dimensionamiento hidráulico de un separador de petróleo es indispensable el plano completo de las instalaciones donde se situará, especialmente de las líneas de fluido de los recipientes a los cuales se acoplará, con la finalidad de coincidir en diámetros de tuberías, orientaciones, transporte y demás detalles que permitan la funcionalidad del sistema.

**3.2.8** *Diámetro de salida de gas.* El dimensionamiento de la boca de la fase líquida se basará en el tiempo de Surge y Holdup de 60 y 120 s respectivamente, así como en los rangos de velocidades recomendadas: de 30 a 60 para el gas y de 3 a 10 para la salida de líquido en pies por segundo. (MANNING and Thompson, 1995). Además se instalara una boca de mantenimiento (Manhole) de 24 in de diámetro y por último una boca drenaje de 2 in.

$$A_g = \frac{Q_v}{V_g} = \frac{19,38 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{30 \frac{\text{ft}}{\text{s}}} = 0,65 \text{ ft}^2$$

$$d_g = \sqrt{\frac{4A_g}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(0,65 \text{ ft}^2)}{\pi}} = 0,91 \text{ ft}$$

**3.2.9** *Altura del nivel bajo de líquido ( $H_{LLL}$ ).* Se obtiene de la tabla del Anexo 5.

$$H_{LLL} = 1,25 \text{ ft} + 0,92 \text{ ft} = 2,17 \text{ ft}$$

Uno de los grandes beneficios que brinda un separador vertical, es la acumulación de elementos indeseables en el fondo del recipiente y su fácil remoción, además de que si bien en el transcurso del dimensionamiento solo se tomaron en cuenta las fases

líquida y gaseosa, existe una pequeña cantidad de agua presente que por su densidad se ubica en el fondo del separador.

Por esta razón se instalará una tercera boca en la cabeza inferior desplazando así a la boca principal de salida de fluido, a 3,5 in de la línea referencial (datum line) o tangencial al cuerpo del recipiente. Cumpliendo con los 5 espesores de distancia mínima recomendada entre dos costuras de suelda para un espesor tentativo de 0,5 in. La altura  $H_{LLL}$  partirá desde la línea de eje de la boca principal de salida de fluido.

**3.2.10 Volumen de surge.** Si éste no es especificado, se selecciona el tiempo de Surge de la tabla del Anexo 4.

$$V_s = (T_s)(Q_L) \quad (19)$$

$$= (60 \text{ s}) \left( 1,72 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}} \right) = 103,2 \text{ ft}^3$$

Dónde;

$V_s$  = Volumen de Surge, en  $\text{ft}^3$ .

$T_s$  = Tiempo Surge, en segundos.

**3.2.11 Altura desde el nivel normal de líquido hasta el nivel alto:** También llamado nivel alto de alarma, se recomienda que sea de 6in como mínimo.

$$H_s = \frac{V_s}{(\pi/4)D^2} \quad (20)$$

$$= \frac{4(103,2 \text{ ft}^3)}{\pi(5)^2} = 5,25 \text{ ft}$$

Entonces:

$$H_{NLL} = 20,35 \text{ ft (Altura normal de líquido)}$$

Dónde;

$H_s$  = Altura de Surge, en ft.

**3.2.12 Volumen de holdup.** Generalmente se selecciona el tiempo de Holdup de la tabla del Anexo 4 y se calcula el volumen de Holdup. Dado que el volumen bruto del recipiente está dado se procederá de la siguiente forma:

$$H_T = H_{LLL} + H_H + H_S + H_{LIN} + H_D + H_{ME} \quad (21)$$

$$H_H = 3,11 - 2,17 - 2,5 - 2,5 - 1,5 - 5,25 = 18,18 \text{ ft}$$

$$V_H = \frac{\pi d^2 H_H}{4} = \frac{\pi(5)^2(18,18)}{4} = 357,04 \text{ ft}^3$$

Dónde;

$V_H$  = Volumen de Holdup, en  $\text{ft}^3$ .

$H_H$  = Altura de Holdup, en ft.

**3.2.13 Diámetro de salida de líquido.**

$$Q_L = \frac{V_H}{t_H} = \frac{357,04 \text{ ft}^3}{120 \text{ s}} = 2,98 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

$$A_L = \frac{Q_L}{V_L} = \frac{2,98 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{6 \frac{\text{ft}}{\text{s}}} = 0,5 \text{ ft}^2$$

$$d_L = \sqrt{\frac{4A_L}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(0,5 \text{ ft}^2)}{\pi}} = 0,8 \text{ ft} \quad (\text{Se tomará } 10 \text{ in})$$

Tabla 5: Orientación y dimensiones de bocas

Boca	Descripción	Diámetro(in)	Dirección
B1	Ingreso	12	Norte, 0°
B2	Salida de Líquido	10	Sur, 180°
B3	Salida de Gas	12	Cabeza Superior
B4	Drenaje	2	Cabeza Inferior
B5	Manhole	24	Norte, 270°

Fuente: El autor

Cabe mencionar que la orientación de bocas se sustenta en el diagrama de operación global de la planta, el cual determina la ubicación de los equipos antes y después del separador, con el fin de que exista una armonía y coincidencia en la planta.

Tabla 6: Ubicación de soldaduras longitudinales

Boca	Ángulo de inicio	Plancha(in)
Cilindro #1	330°	190,0664
Cilindro #2	30°	190,0664
Cilindro #3	330°	190,0664
Cilindro #4	30°	190,0664
Cilindro #5	330°	190,0664
Soporte de faldón	30°	190,0664

Fuente: El autor

### 3.3 Diseño mecánico de una bota de gas

El diseño mecánico de ciertos componentes del recipiente a presión están basados en la norma ASME sección VIII, división 1, pero componentes como: faldón, soportes, orejas de izaje y demás, no están contemplados en la misma por lo que se recurrió a otros manuales constructivos. A continuación se presentan los cálculos del diseño.

- **Material.** Tomando en cuenta el servicio que brindará además de factores como presión y temperatura, del Anexo 7 se escogió para las cabezas y cilindros que conformarán el cuerpo el material: SA – 516 70.
- **Presión de Diseño.** Se toma el valor más alto que resulte de las dos siguientes ecuaciones. Además, esta presión se puede establecer de acuerdo a los márgenes de seguridad del constructor, que en este caso será 100 psi.

$$P = 1.1P_0 \quad (22)$$

$$P = 30 + P_0 \quad (23)$$

Dónde;

$P$  = Presión de diseño, en psi.

$P_0$  = Presión de operación, en psi.

**3.3.1 Cuerpo del recipiente.** Los cilindros que conforman el cuerpo del recipiente serán diseñados bajo las exigencias del código ASME, así como por los principios propuestos por Bergman, con la finalidad de obtener resultados más cercanos a la realidad.

### *Muestra de cálculo para el Cilindro #1*

- Material: SA – 516 70
- Altura: 5,32 in
- Diámetro interno: 60 in
- Presión interna de diseño:  $P = 100$  psi; 250 °F
- Presión externa de diseño:  $P_o = 15$  psi; 150 °F
- Corrosión interna admisible: 0,125 in
- Radiografía:
  - Juntas longitudinales - Full (Tipo 1)
  - Juntas circunferenciales en los extremos- Spot (Tipo 1)

**3.3.1.1** *Espesor requerido.* Análisis a la presión y temperatura de diseño. El radio está basado en el espesor mínimo recomendado por UG-16. Se tomará de radio la diferencia entre el radio nominal exterior y el espesor nominal. Aunque se conoce que los esfuerzos circunferenciales de las juntas longitudinales son más críticos que los longitudinales de las juntas circunferenciales, se tomará el mayor valor entre los espesores siguientes, según la UG-27. Según el servicio que brindará la bota de gas, se requerirá un radiografiado tipo RT-2 (UW-11-a5).

$$t = \frac{P_{di}R}{SE - 0,6P} \quad (24)$$

$$= \frac{(100 \text{ psi})(30,125 \text{ in})}{(20\,000 \text{ psi})(1) - 0,6(100 \text{ psi})} = 0,15 \text{ in}$$

$$t = \frac{P_{di}R}{2SE + 0,4P} + CA$$

$$= \frac{(100 \text{ psi})(30,125 \text{ in})}{(2)(20\,000 \text{ psi})(0,7) + 0,4(100 \text{ psi})} = 0,11 \text{ in}$$

Entonces;

$$t = 0,15 \text{ in} + 0,125 \text{ in} = 0,28 \text{ in}$$

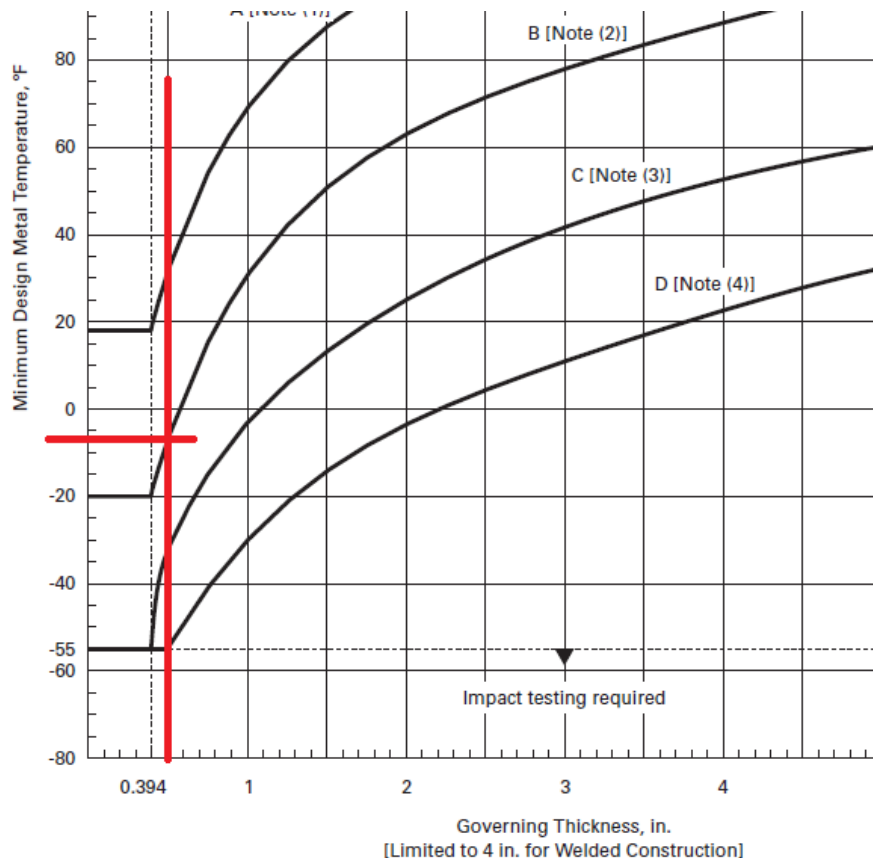
**3.3.1.2 Presión máxima de trabajo admisible.** Se analiza a la temperatura de diseño con el radio utilizado en la determinación del espesor requerido, el espesor comercial superior próximo al ya determinado es de 0,5 in.

$$MAWP = \frac{SEt}{R + 0,6t} - P_s \quad (25)$$

$$= \frac{(20\,000 \text{ psi})(1)(0,375)}{(30,125) + 0,6(0,375)} - 0 = 247,22 \text{ psi}$$

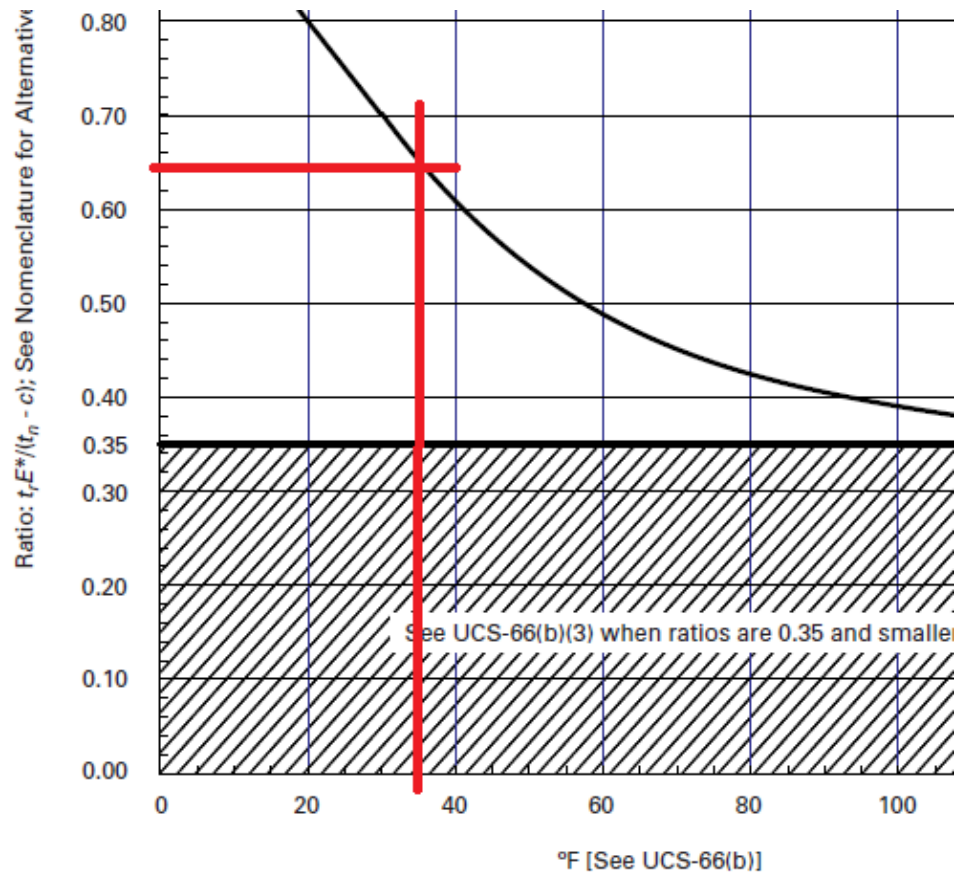
**3.3.1.3 MDMT.** Para éste análisis se utilizarán los Anexos del 49 al 53. Consiste en hallar los MDMT de las soldaduras relacionadas al cilindro en estudio, siendo el valor más alto el crítico. Para ello se determinará el espesor gobernante y de la gráfica del Anexo 50 se sabrá si el material requiere de una prueba de impacto o no, además si el MDMT hallado es mayor que el de diseño se deberá reducir ese valor por medio del Anexo 49.

En primera instancia y debido a la junta y material se obtiene un MDMT de - 7 °F. El cual es menor al MDMT esperado y de diseño de - 20 °F. Se procede a reducirlo



$$\text{Razón} = \frac{t_r E}{t_n - c} = \frac{(0,28 \text{ in})(0,85)}{0,5 \text{ in} - 0,125 \text{ in}} = 0,63$$

Del Anexo 51 se determinó una temperatura de reducción de 34 °F, resultando en un MDMT final de 41 °F, el cual es menor al de diseño y por ende, satisfactorio.



Dónde;

$t_r$  = Espesor requerido, en in.

$t_n$  = Espesor nominal, en in.

$c$  = Corrosión admisible, en in.

$E$  = Eficiencia de la junta (véase Anexo 9).

**3.3.1.4 Presión máxima admisible.** Se analiza con el espesor comercial sumado el valor por corrosión, además de tomar el radio interno del recipiente

$$\text{MAP} = \frac{SEt}{R + 0,6t} \quad (26)$$

$$= \frac{(20\,000\text{ psi})(1)(0,5\text{ in})}{30\text{ in} + 0,6(0,5\text{ in})} = 330,03\text{ psi}$$

**3.3.1.5** *Presión externa.* Análisis a la temperatura externa de diseño y bajo corrosión, cuando el valor resultante de la ecuación (28) es igual o mayor que 10, esta presión será calculada con la ecuación (29).

$$\frac{L}{D_o} \quad (27)$$

$$= \frac{198,26\text{ in}}{61\text{ in}} = 3,25$$

$$\frac{D_o}{t} \quad (28)$$

$$= \frac{61\text{ in}}{0,33\text{ in}} = 184,40$$

$$A = 0,000164; B = 2\,112\text{ psi}$$

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} \quad (29)$$

$$= \frac{4(2\,112\text{ psi})}{3(61\text{ in}/0,33\text{ in})} = 15,27\text{ psi}$$

$$P_a = \frac{2AE}{3(D_o/t)} \quad (30)$$

El valor de “B” se determina de la siguiente forma:

1. Asumir un valor para t y determinar el valor de la ecuación (27) y (28).
2. Entrar a la figura “G” del Anexo 14 para obtener el valor de la constante “A”
3. Entrar a la figura CS-2 del Anexo 15 para obtener el valor de la constante “B”

Si al calcular  $P_a$  éste resulta menor a la presión externa de diseño, se deberá incrementar el espesor t asumido inicialmente o reducir la distancia L al anillo de



refuerzo. Si los valores de “A” caen fuera de rango para encontrar el valor de “B”, se deberá usar la ecuación (30).

- **Espesor de diseño para la presión externa ( $P_a$ )**

Análisis con el espesor hallado en el paso anterior.

$$t_a = t + \text{corrosión} \quad (31)$$

$$= 0,33 \text{ in} + 0,125 \text{ in} = 0,45 \text{ in}$$

- **Presión externa máxima admisible (MAEP).**

Análisis a la temperatura externa de diseño y bajo corrosión.

$$\frac{L}{D_o} = \frac{198,26 \text{ in}}{61 \text{ in}} = 3,25$$

$$\frac{D_o}{t} = \frac{61 \text{ in}}{0,375 \text{ in}} = 162,67$$

$$A = 0,000192; B = 2\,522 \text{ psi}$$

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} = \frac{4(2\,522 \text{ psi})}{3\left(\frac{61 \text{ in}}{0,375 \text{ in}}\right)} = 20,67 \text{ psi}$$

- **% de elongación de fibras extremas**

Según UCS-79-d, para materiales formados en frío se requiere el análisis de la fibra extrema, que está relacionada a la cantidad de deformación que sufrió el material al ser rolado. Si éste porcentaje supera el 5% el material no es apto para el diseño.

$$EFE = \frac{50t}{R_f} \left(1 - \frac{R_f}{R_o}\right) \quad (32)$$

$$= \frac{50(0,5 \text{ in})}{30,25 \text{ in}} \left(1 - \frac{30,25 \text{ in}}{\infty}\right) = 0,82 \%$$

Dónde;

$t$  = Espesor mínimo requerido de envolvente cilíndrica, en in.

$P_{di}$  = Presión interna de diseño, en psi.

$R$  = Radio interior de la envolvente sometida a consideración, en in.

$S$  = Valor del esfuerzo máximo admisible, en psi (véase Anexo 8).

$E$  = Eficiencia de la junta (véase Anexo 9).

$E$  = Módulo de elasticidad del material (véase Anexo 15), en psi.

$CA$  = Espesor por corrosión, en in.

$P_s$  = Presión estática del líquido en el anillo analizado, en psi.

$D_o$  = Diámetro exterior calculado con el espesor utilizado en MAP, en in.

$P_a$  = Presión externa máxima de trabajo, en psig.

$L$  = Distancia entre el anillo de refuerzo y el centroide de la cabeza, en in.

$R_f$  = Radio final de la línea de centro, en in.

$R_o$  = Radio original de la línea de centro (infinito para placa plana), en in.

**3.3.1.6 Verificación de resistencia.** La metodología común de los códigos de diseño se basa en escoger de entre una lista de materiales comprobados uno que mejor se adapte a los requerimientos, según sus valores máximos de esfuerzos admisibles bajo un rango de temperaturas. Pero esto no siempre refleja todo lo que conlleva el diseño de un recipiente a presión, por esta razón para el presente trabajo de grado se utilizarán las recomendaciones de (BERGMAN, 1955), documento en el cual se plantea una verificación basada en combinaciones de cargas como: presión interna y externa, peso del cuerpo del recipiente, columna de fluido, carga de viento y carga de sismo.

Estas dos últimas cargas poseen momentos propios de su naturaleza, los cuales van variando según la altura del recipiente en que se analiza. Estas verificaciones se realizarán en cada uno de los anillos que conformarán el cuerpo del recipiente, tomando en cuenta que el peso es el resultado de la suma del anillo y de todos los elementos por encima de él.

- **Momento y deflexión debido a la carga de viento.**

Basado en el código (UBC, 1997). Se realizará el análisis en condiciones de operación y bajo corrosión.

- Velocidad básica del viento: 85 mph

- Categoría de exposición: C
- Límite de deflexión en la parte más alta: 6 in por cada 100 ft
- Altura total del recipiente: 38,9 ft
- Diámetro mínimo en estado operativo y corroído: 5,0833
- Diámetro mínimo en estado vacío y corroído: 5,0833

$$P_w = C_e C_q q_s I_w \quad (33)$$

$$= (1,24)(0,8)(18,6)(1) = 18,45 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$$

$$V = P_w D_o h \quad (34)$$

$$\left(18,45 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}\right)(5,08 \text{ ft})(0,44 \text{ ft}) = 41,24 \text{ lbf}$$

$$M_w = V H_c \quad (35)$$

$$= (41,24 \text{ lb})(0,22 \text{ ft}) = 9,07 \text{ lbft}$$

$$I = R^3 \pi t \quad (36)$$

$$= (2,53)^3 \pi (0,03) = 1,58 \text{ ft}^4$$

$$\Delta_M = \frac{P_w D_1 H (12H)^3}{8EI} \quad (37)$$

$$= \frac{18,45 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2} (5,08 \text{ ft})(37,5 \text{ ft})(12(37,5 \text{ ft}))^3}{(8)(28,5 \times 10^6 \text{ psi})(1,58 \text{ ft}^4)(12^4)} = 0,0429 \text{ in}$$

Dónde;

$C_e$  = Coeficiente de altura, exposición y factor Gust (Anexo 16).

$C_q$  = Coeficiente de fuerza de viento (Anexo 17).

$I_w$  = Factor de importancia (Anexo 18).

$q_s$  = Presión de estancamiento del viento (Anexo 19).

$P_w$  = Presión de viento, en psf.

$V$  = Fuerza ejercida por el viento, en lbf.

$h$  = Altura desde el punto de estudio hasta el extremo superior, en ft.

$M_w$  = Momento flector debido al viento, en lbf-ft.

$H_c$  = Distancia desde el punto de estudio hasta el centroide, en ft.

$I$  = Momento de inercia para recipientes placa delgada (cuando  $R > 10t$ ), en  $ft^4$ .

$R$  = Radio medio del recipiente, en in.

$t$  = Espesor de faldón, en in.

$E$  = Módulo de elasticidad, en psi.

$\Delta_M$  = Deflexión máxima en la parte superior del elemento en estudio, en in.

$H$  = Altura total del recipiente incluyendo el faldón, en ft.

$D_1$  = Ancho del recipiente, en ft.

- **Presión externa + peso + carga de viento.**

Si al multiplicar la razón  $P_e$  con la presión externa de diseño resulta menor o igual que la MAEP, el espesor de diseño del cilindro será satisfactorio.

$$P_v = \frac{W}{2\pi R_m} + \frac{M_w}{\pi R_m^2} \quad (38)$$

$$= \frac{7\,391,36 \text{ lb}}{2\pi(30,3125 \text{ in})} + \frac{108,84 \text{ lb.in}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2} = 38,84 \frac{\text{lb}}{\text{in}}$$

$$\alpha = \frac{P_v}{P_{de} D_o} \quad (39)$$

$$= \frac{38,84 \frac{\text{lb}}{\text{in}}}{(15 \text{ psi})(61)} = 0,0425 \quad \text{entonces; } n = 3$$

$$m = \frac{1,23}{\left(\frac{L}{D_o}\right)^2} \quad (40)$$

$$\frac{1,23}{\left(\frac{198,26 \text{ in}}{61 \text{ in}}\right)^2} = 0,1164$$

$$P_e = \frac{n^2 - 1 + m + m\alpha}{n^2 - 1 + m} \quad (41)$$

$$= \frac{(3)^2 - 1 + 0,1164 + (0,1164)(0,0425)}{(3)^2 - 1 + 0,1164} = 1,0006$$

$$(P_{de})(P_e) \leq MAEP \quad (42)$$

$$(15 \text{ psi})(1,0006) \leq 20,67 \text{ psi}$$

$$15,0091 \text{ psi} \leq 20,67 \text{ psi.}$$

Es espesor de diseño para el cilindro es satisfactorio.

Dónde;

W = Es el peso total por encima del elemento en estudio, en lb.

R<sub>m</sub> = Radio medio resultado de restarle la corrosión al radio total y dividirlo para dos, en in.

P<sub>e</sub> = Proporción.

n = Número de Lobes, (Anexo 20)

- **Momento debido a la carga de sismo.**

Basado en la (NEC, 2014). La carga total a utilizar en los cálculos para la obtención de la cortante basal está conformada por la carga muerta (peso del recipiente nuevo y en operación) más el 25% de la carga viva (personal de mantenimiento). Cabe mencionar que la cortante basal se reduce según la altura del recipiente.

- Altura total del recipiente: 38,9 ft
- Carga muerta: 58 573,36 lb
- Carga viva: 200 lb
- Zona: Orellana
- Perfil de suelo: arcilloso – blando
- Para estructuras de acero sin arriostramientos C<sub>t</sub> = 0,072 y α = 0,8
- Factor η para provincias del oriente: 2,6

$$T_c = \frac{0,55F_sF_d}{F_a} \quad (43)$$

$$= \frac{0,55(1,6)(1,75)}{(1,5)} = 1,03$$

$$T = C_t h_n^\alpha \quad (44)$$

$$= (0,072)(11,86 \text{ m})^{0.8} = 0.52$$

Se tomará una de las siguientes ecuaciones:

$$S_a = \eta Z F_a \text{ para } 0 \leq T \leq T_c \quad (45)$$

$$= (2,6)(0,15)(1,5) = 0,51$$

$$S_a = \eta Z F_a \left( \frac{T_c}{T} \right)^r \text{ para } T > T_c \quad (46)$$

$$\Phi_p = \Phi_{PA} \Phi_{PB} \quad (47)$$

$$\Phi_E = \Phi_{EA} \Phi_{EB} \quad (48)$$

Debido a la forma de la bota de gas se tomarán los valores  $\Phi_p$  y  $\Phi_E$  de 1

$$V = \frac{I S_a W}{R \Phi_p \Phi_E} \quad (49)$$

$$= \frac{(1,5)(0,51)(58\,623,36 \text{ lb})}{(2)(1)(1)} = 22\,373 \text{ lb}$$

$F_t$  no debería exceder un 25 % de  $V$

$$F_t = 0,07TV \quad (50)$$

$$= 0,07(0,52)(22\,373 \text{ lb}) = 814,38 \text{ lb}$$

$$M = F_t H + (V - F_t)(2H/3) \quad (51)$$

$$= (814,38 \text{ lb})(38,9 \text{ ft}) + (22\,373 \text{ lb} - 814,38 \text{ lb})[(0,67)(38,9 \text{ ft})] = 651\,902 \text{ lbft}$$

$$M_x = F_t X \text{ para } X \leq \frac{H}{3} \quad (52)$$

$$= (814,38 \text{ lb})(0,88 \text{ ft}) = 724,45 \text{ lbft}$$

$$M_x = F_t H + (V - F_t)(X - H/3) \text{ para } X > \frac{H}{3} \quad (53)$$

Dónde;

$V$  = Fuerza cortante en la base, cambia según la altura, en lbf.

$F_s, F_a, F_d$  = Coeficientes de amplificación de suelo, (Anexo 24).

$h_n$  = Altura del recipiente en estudio, en m.

$C_t, \alpha, \eta$  = Factores propuestos por la NEC 2014.

$Z$  = Factor de zona sísmica, (Anexo 21)

$\Phi_p \Phi_E$  = Factores de configuración estructural en planta y elevación (Anexos 25, 26).

$H$  = Altura total del recipiente, en ft.

$f_t$  = Fuerza sísmica horizontal total en el tope del recipiente, en lbf.

$M$  = Máximo momento en la base del recipiente, en lb ft.

$M_x$  = Momento a la distancia  $X$ , en lb ft.

$F_t$  = Fuerza sísmica horizontal total en el tope del recipiente, en lbf.

$X$  = Distancia en el punto de estudio del recipiente, en ft.

$W$  = Peso por encima del punto en estudio, en lb.

$I$  = Factor de importancia, (Anexo 44).

$R$  = Factor de reducción de respuesta, (Anexo 22).

- **Presión externa + peso + carga sísmica.**

Se utilizará el mismo procedimiento que en la verificación 1, pero ahora utilizando el momento debido a la carga de sismo así como la aceleración vertical  $A_v = 0.2$ .

$$P_v = \frac{(1 + A_v)W}{2\pi R_m} + \frac{M}{\pi R_m^2} \quad (54)$$

$$= \frac{(1 + 0,2)(7\,391,36 \text{ lb})}{2\pi(30,3125 \text{ in})} + \frac{8\,693.37 \text{ lbin}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2} = 49,58 \frac{\text{lb}}{\text{in}}$$

$$\alpha = \frac{P_v}{P_{de}D_o} = \frac{49,58 \frac{\text{lb}}{\text{in}}}{(15 \text{ psi})(61)} = 0,05418$$

$$n = 3$$

$$m = \frac{1,23}{\left(\frac{L}{D_o}\right)^2} = \frac{1,23}{\left(\frac{198,26 \text{ in}}{61 \text{ in}}\right)^2} = 0,1164$$

$$P_e = \frac{n^2 - 1 + m + m\alpha}{n^2 - 1 + m} = \frac{(3)^2 - 1 + 0,1164 + (0,1164)(0,05418)}{(3)^2 - 1 + 0,1164} = 1,00078$$

$$(P_{de})(P_e) \leq \text{MAEP}$$

$$(15 \text{ psi})(1,00078) \leq 20,67 \text{ psi}$$

$$15,012 \text{ psi} \leq 20,67 \text{ psi.}$$

Es espesor de diseño para el cilindro es satisfactorio, se tomará 0,5 in

- **Espesor requerido debido presión y cargas externas.**

Se determinarán los esfuerzos admisibles los cuales permitirán la obtención de los espesores requeridos bajo tensión y compresión, producto de las cargas de sismo y viento. Las condiciones de análisis serán las siguientes:

- Operación en caliente y corroído
- Operación en caliente y nuevo
- Caliente cerrado y corroído
- Caliente cerrado y nuevo
- Vacío y corroído
- Vacío y nuevo
- En vacío
- Caliente cerrado, corroído, en vacío y momentos excéntricos

Para su obtención se encontrará el valor de B en el Anexo 15, luego se tomará el mínimo de entre el valor encontrado y el esfuerzo máximo del material. Para cada condición varían los parámetros al evaluar las ecuaciones.



- *Esfuerzo de compresión admisible, caliente y corroído.*

$$A = \frac{0,125t}{R_o} \quad (55)$$

$$= \frac{0,125(0,375 \text{ in})}{(30,5 \text{ in})} = 0,001537$$

$$B = 13\,910 \text{ psi}$$

$$S_t = 20\,000 \text{ psi} = 13\,910 \text{ psi}$$

- *Esfuerzo de compresión admisible, caliente y nuevo.*

$$A = \frac{0,125t}{R_o} = \frac{0,125(0,5 \text{ in})}{(30,5 \text{ in})} = 0,002049$$

$$B = 15\,069 \text{ psi}$$

$$S_t = 20\,000 \text{ psi} = 15\,069 \text{ psi}$$

- *Esfuerzo de compresión admisible, frío y nuevo.*

$$A = \frac{0,125t}{R_o} = \frac{0,125(0,5 \text{ in})}{(30,5 \text{ in})} = 0,002049$$

$$B = 15\,069 \text{ psi}$$

$$S_t = 20\,000 \text{ psi} = 15\,069 \text{ psi}$$

- *Esfuerzo de compresión admisible, frío y corroído.*

$$A = \frac{0,125t}{R_o} = \frac{0,125(0,375 \text{ in})}{(30,5 \text{ in})} = 0,001537$$

$$B = 13\,910 \text{ psi}$$

$$S_t = 20\,000 \text{ psi} = 13\,910 \text{ psi}$$

- *Esfuerzo de compresión admisible, en vacío y corroído.*

$$A = \frac{0,125t}{R_o} = \frac{0,125(0,375 \text{ in})}{(30,5 \text{ in})} = 0,001537$$

$$B = 13\,910 \text{ psi}$$

$$S_t = 20\,000 \text{ psi} = 13\,910 \text{ psi}$$

- *En operación, caliente y corroído, viento, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_t K_s E_c + 0.4|P|} \quad (56)$$

$$= \frac{(100 \text{ psi})(30,125 \text{ in})}{2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85) + 0,4|100 \text{ psi}|} = 0,0738 \text{ in}$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_t K_s E_c} \quad (57)$$

$$= \frac{108,84 \text{ lbin}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,00000184 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t K_s E_c} \quad (58)$$

$$= \frac{7\,391,36 \text{ lb}}{2\pi(30,3125 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,00187 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w \quad (59)$$

$$= (0,0738 + 0,00000184 - 0,00187) \text{ in} = 0,0719 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| \quad (60)$$

$$= |0,00000184 + 0,00187 - 0,0738| \text{ in} = 0,0719 \text{ in}$$

- **Presión de trabajo máxima admisible, esfuerzo longitudinal**

$$P = \frac{2S_t K_s E_c (t - t_m + t_w)}{R - 0.4(t - t_m + t_w)} \quad (61)$$

$$= \frac{2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)(0,375 - 0,00000184 + 0,00187)\text{in}}{30,125 \text{ in} - 0,4(0,375 - 0,00000184 + 0,00187)\text{in}} = 512,98 \text{ psi}$$

- *En operación, caliente y nuevo, viento, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_t K_s E_c + 0.4|P|} = \frac{(100 \text{ psi})(30 \text{ in})}{2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85) + 0,4|100 \text{ psi}|} = 0,0735 \text{ in}$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_t K_s E_c} = \frac{335,84 \text{ lb.in}}{\pi(30,25 \text{ in})^2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,00000573 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t K_s E_c} = \frac{7\,812,66 \text{ lb}}{2\pi(30,25 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,00201 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0,0735 + 0,00000573 - 0,00201)\text{in} = 0,0715 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,00000573 + 0,00201 - 0,0735| \text{in} = 0,0714 \text{ in}$$

$$P = \frac{2S_t K_s E_c (t - t_m + t_w)}{R - 0.4(t - t_m + t_w)}$$

$$P = \frac{2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)(0,5 - 0,00000573 + 0,00201)\text{in}}{30 \text{ in} - 0,4(0,5 - 0,00000573 + 0,00201)\text{in}} = 687,33 \text{ psi}$$

- *Cerrado, caliente y corroído, viento, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_c K_s + 0.4|P|} = 0$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_c K_s} = \frac{108,84 \text{ lbin}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)} = 0,00000226 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_c K_s} = \frac{7\,391,36 \text{ lb}}{2\pi(30,3125 \text{ in})(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)} = 0,00232 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0 + 0,00000226 - 0,00232)\text{in} = 0,0023 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,00000226 + 0,00232 - 0| \text{ in} = 0,0023 \text{ in}$$

- *Cerrado, caliente y nuevo, viento, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_c K_s + 0,4|P|} = 0$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_c K_s} = \frac{335,84 \text{ lbin}}{\pi (30,25 \text{ in})^2 (15\,069,32 \text{ psi}) (1,20)} = 0,00000646 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_c K_s} = \frac{7\,812,66 \text{ lb}}{2\pi (30,25 \text{ in}) (15\,069,32 \text{ psi}) (1,20)} = 0,00227 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0 + 0,00000646 - 0,00227) \text{ in} = 0,0023 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,00000646 + 0,00227 - 0| \text{ in} = 0,0023 \text{ in}$$

- *Vacío, corroído, viento, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_c K_s + 0,4|P|} = 0$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_c K_s} = \frac{108,84 \text{ lbin}}{\pi (30,3125 \text{ in})^2 (13\,910,45 \text{ psi}) (1,20)} = 0,00000226 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_c K_s} = \frac{7\,391,36 \text{ lb}}{2\pi (30,3125 \text{ in}) (13\,910,45 \text{ psi}) (1,20)} = 0,00232 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0 + 0,00000226 - 0,00232) \text{ in} = 0,0023 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,00000226 + 0,00232 - 0| \text{ in} = 0,0023 \text{ in}$$

- *Vacío, nuevo, viento, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_c K_s + 0,4|P|} = 0$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_c K_s} = \frac{335,84 \text{ lbin}}{\pi (30,25 \text{ in})^2 (15\,069,32 \text{ psi}) (1,20)} = 0,00000646 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_c K_s} = \frac{7\,270,41 \text{ lb}}{2\pi(30,25 \text{ in})(15\,069,32 \text{ psi})(1,20)} = 0,00211 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0 + 0,00000646 - 0,00211) \text{ in} = 0,0021 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,00000646 + 0,00211 - 0| \text{ in} = 0,0021 \text{ in}$$

- *En vacío, viento, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_c K_s + 0,4|P|} = \frac{(-15 \text{ psi})(30,125 \text{ in})}{2(13\,910,45 \text{ psi})(1,20) + 0,4|-15 \text{ psi}|} = -0,0135 \text{ in}$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_c K_s E_c} = \frac{108,84 \text{ lb. in}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)} = 0,00000226 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_c K_s} = \frac{7\,391,36 \text{ lb}}{2\pi(30,3125 \text{ in})(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)} = 0,00232 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (-0,0135 + 0,00000226 - 0,00232) \text{ in} = 0,0158 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,00000226 + 0,00232 - (-0,0135)| \text{ in} = 0,0158 \text{ in}$$

$$P = \frac{2S_c K_s (t - t_m + t_w)}{R - 0,4(t - t_m + t_w)}$$

$$= \frac{2(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)(0,375 - 0,00000226 + 0,00232) \text{ in}}{30,125 \text{ in} - 0,4(0,375 - 0,00000226 + 0,00232) \text{ in}} = 422,02 \text{ psi}$$

- *Cerrado y caliente, corroído, peso y momentos excéntricos solamente, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_c K_s + 0,4|P|} = 0$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_c K_s} = \frac{3\,354 \text{ lb in}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2(13\,910,45 \text{ psi})(1)} = 0,0001 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_c K_s} = \frac{7\,391,36 \text{ lb}}{2\pi(30,3125 \text{ in})(13\,910,45 \text{ psi})(1)} = 0,00277 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0 + 0,0001 - 0,00277)\text{in} = 0,0027 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,0001 + 0,00277 - 0|\text{in} = 0,0029 \text{ in}$$

- *En operación, caliente y corroído, sismo, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_t K_s E_c + 0,4|P|} = \frac{(100 \text{ psi})(30,125 \text{ in})}{2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85) + 0,4|100 \text{ psi}|} = 0,0738 \text{ in}$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_t K_s E_c} = \frac{8\,693,37 \text{ lbin}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,000148 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t K_s E_c} = \frac{7\,391,36 \text{ lb}}{2\pi(30,3125 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,00187 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0,0738 + 0,000148 - 0,00187)\text{in} = 0,072 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{(1 + A_v)W}{2\pi R_m S_t K_s E_c} \quad (62)$$

$$= \frac{(1,2)(7\,391,36 \text{ lb})}{2\pi(30,3125 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,00224 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,000148 + 0,00224 - 0,0738|\text{in} = 0,0714 \text{ in}$$

$$P = \frac{2S_t K_s E_c(t - t_m + t_w)}{R - 0,4(t - t_m + t_w)}$$

$$= \frac{2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)(0,375 - 0,000148 + 0,00187)\text{in}}{30,125 \text{ in} - 0,4(0,375 - 0,000148 + 0,00187)\text{in}} = 512,78 \text{ psi}$$

- *En operación, caliente y nuevo, sismo, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_t K_s E_c + 0,4|P|} = \frac{(100 \text{ psi})(30 \text{ in})}{2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85) + 0,4|100 \text{ psi}|} = 0,0735 \text{ in}$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_t K_s E_c} = \frac{18\,036,37 \text{ lbin}}{\pi(30,25 \text{ in})^2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,000307 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t K_s E_c} = \frac{7\,812,66 \text{ lb}}{2\pi(30,25 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,0020 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0,0735 + 0,000307 - 0,00201) \text{ in} = 0,0718 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{(1 + A_v)W}{2\pi R_m S_t K_s E_c} = \frac{(1,2)(7\,812,66 \text{ lb})}{2\pi(30,25 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,00241 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,000307 + 0,00241 - 0,0735| \text{ in} = 0,0708 \text{ in}$$

$$P = \frac{2S_t K_s E_c (t - t_m + t_w)}{R - 0,4(t - t_m + t_w)}$$

$$= \frac{2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)(0,5 - 0,000307 + 0,00201) \text{ in}}{30 \text{ in} - 0,4(0,5 - 0,000307 + 0,00201) \text{ in}} = 686,91 \text{ psi}$$

- *Cerrado, caliente y corroído, sismo, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_c K_s E_c + 0,4|P|} = 0$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_t K_s E_c} = \frac{8\,693,37 \text{ lbin}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,000148 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t K_s E_c} = \frac{7\,391,36 \text{ lb}}{2\pi(30,3125 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,00190 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0 + 0,000148 - 0,00190) \text{ in} = 0,0018 \text{ in}$$

$$t_{mc} = \frac{M}{\pi R_m^2 S_c K_s} = \frac{8\,693,37 \text{ lbin}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)} = 0,000180 \text{ in}$$

$$t_{wc} = \frac{(1 + A_v)W}{2\pi R_m S_c K_s} \quad (63)$$

$$= \frac{(1,2)(7\,391,36 \text{ lb})}{2\pi(30,3125 \text{ in})(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)} = 0,00279 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,000180 + 0,00279 - 0| \text{ in} = 0,0030 \text{ in}$$

- *Cerrado, caliente y nuevo, sismo, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_c K_s E_c + 0,4|P|} = 0$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_t K_s E_c} = \frac{18\,036,37 \text{ lbin}}{\pi(30,25 \text{ in})^2 (20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,000307 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t K_s E_c} = \frac{7\,812,66 \text{ lb}}{2\pi(30,25 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,00201 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0 + 0,000307 - 0,00201) \text{ in} = 0,0017 \text{ in}$$

$$t_{mc} = \frac{M}{\pi R_m^2 S_c K_s} = \frac{18\,036,37 \text{ lbin}}{\pi(30,25 \text{ in})^2 (15\,069,32 \text{ psi})(1,20)} = 0,000347 \text{ in}$$

$$t_{wc} = \frac{(1 + A_v)W}{2\pi R_m S_c K_s} = \frac{(1,2)(7\,812,66 \text{ lb})}{2\pi(30,25 \text{ in})(15\,069,32 \text{ psi})(1,20)} = 0,00273 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,000347 + 0,00273 - 0| \text{ in} = 0,0030 \text{ in}$$

- *Vacío, corroído, sismo, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_c K_s E_c + 0,4|P|} = 0$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_t K_s E_c} = \frac{5\,673,91 \text{ lbin}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2 (20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,0000964 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t K_s E_c} = \frac{4118,86 \text{ lb}}{2\pi(30,3125 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,00106 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0 + 0,0000964 - 0,00106) \text{ in} = 0,000964 \text{ in}$$

$$t_{mc} = \frac{M}{\pi R_m^2 S_c K_s} = \frac{5\,673,91 \text{ lbin}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2 (13\,910,45 \text{ psi})(1,20)} = 0,000118 \text{ in}$$

$$t_{wc} = \frac{(1 + A_v)W}{2\pi R_m S_c K_s} = \frac{(1,2)(4\,118,86 \text{ lb})}{2\pi(30,3125 \text{ in})(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)} = 0,00155 \text{ in}$$



$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,000118 + 0,00155 - 0| \text{ in} = 0,0017 \text{ in}$$

- *Vacío, nuevo, sismo, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_t K_s E_c + 0,4|P|} = 0$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_t K_s E_c} = \frac{5\,863,91 \text{ lbin}}{\pi(30,25 \text{ in})^2(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,0001 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t K_s E_c} = \frac{4540,16 \text{ lb}}{2\pi(30,25 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(1,20)(0,85)} = 0,00117 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (0 + 0,0001 - 0,00117) \text{ in} = 0,0011 \text{ in}$$

$$t_{mc} = \frac{M}{\pi R_m^2 S_c K_s} = \frac{5863,91 \text{ lb. in}}{\pi(30,25 \text{ in})^2(15\,069,32 \text{ psi})(1,20)} = 0,000113 \text{ in}$$

$$t_{wc} = \frac{(1 + A_v)W}{2\pi R_m S_c K_s} = \frac{(1,2)(4\,540,16 \text{ lb})}{2\pi(30,25 \text{ in})(15\,069,32 \text{ psi})(1,20)} = 0,00158 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,000113 + 0,00158 - 0| \text{ in} = 0,0017 \text{ in}$$

- *En vacío, sismo, cordón de suelda inferior.*

$$t_p = \frac{PR}{2S_c K_s + 0,4|P|} = \frac{(-15 \text{ psi})(30,125 \text{ in})}{2(13\,910,45 \text{ psi})(1,20) + 0,4|-15 \text{ psi}|} = -0,0135 \text{ in}$$

$$t_m = \frac{M}{\pi R_m^2 S_c K_s} = \frac{8\,693,37 \text{ lbin}}{\pi(30,3125 \text{ in})^2(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)} = 0,000180 \text{ in}$$

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t K_s} = \frac{7\,391,36 \text{ lb}}{2\pi(30,3125 \text{ in})(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)} = 0,00232 \text{ in}$$

$$t_t = t_p + t_m - t_w = (-0,0135 + 0,000180 - 0,00232) \text{ in} = 0,0156 \text{ in}$$

$$t_{wc} = \frac{(1 + A_v)W}{2\pi R_m S_c K_s} = \frac{(1,2)(7\,391,36 \text{ lb})}{2\pi(30,3125 \text{ in})(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)} = 0,00279 \text{ in}$$

$$t_c = |t_{mc} + t_{wc} - t_{pc}| = |0,000180 + 0,00279 - (-0,0135)| \text{ in} = 0,0164 \text{ in}$$

$$P = \frac{2S_t K_s (t - t_{mc} + t_{wc})}{R - 0,4(t - t_{mc} + t_{wc})}$$

$$P = \frac{2(13\,910,45 \text{ psi})(1,20)(0,375 - 0,000180 + 0,00279) \text{ in}}{30,125 \text{ in} - 0,4(0,375 - 0,000180 + 0,00279) \text{ in}} = 420,58 \text{ psi}$$

Dónde;

$t_p$  = Espesor requerido bajo presión, en in.

$t_m$  = Espesor requerido bajo momento flector, en in.

$t_w$  = Espesor requerido bajo peso, en in.

$t_t$  = Espesor total requerido bajo tensión, en in.

$t_c$  = Espesor total requerido bajo compresión, en in.

$K_s$  = Incremento del esfuerzo según la UG-23

Tabla 7: Espesores requeridos bajo presión y cargas externas

Condición	Presión P (PSI)	Esfuerzos admisible e incrementado según UG-23 (psi)		Temperatura (°F)	Corrosión C (in)	Carga	Espesor requerido debido a la tensión (in)	Espesor requerido debido a la compresión (in)
		$S_t$	$S_c$					
En operación, caliente y corroído	100	20 000	13 910	250	0,125	Viento	0,0719	0,0719
						Sismo	0,0720	0,0714
En operación, caliente y nuevo	100	20 000	15 069	250	0	Viento	0,0715	0,0714
						Sismo	0,0718	0,0708
Cerrado, caliente y corroído	0	20 000	13 910	250	0,125	Viento	0,0023	0,0023
						Sismo	0,0018	0,0030
Cerrado, caliente y nuevo	0	20 000	15 069	250	0	Viento	0,0023	0,0023
						Sismo	0,0017	0,0031
Vacío y corroído	0	20 000	13 910	70	0,125	Viento	0,0023	0,0023
						Sismo	0,0010	0,0017
Vacío y nuevo	0	20 000	15 069	70	0	Viento	0,0021	0,0021
						Sismo	0,0011	0,0017
En vacío	-15	20 000	13 910	150	0,125	Viento	0,0158	0,0158
						Sismo	0,0156	0,0164
Cerrado, caliente y corroído, peso y momentos excéntricos solamente	0	20 000	13 910	250	0,125	Peso	0,00267	0,00287

Fuente: El autor

**3.3.2 Cabezas.** Se calculará el espesor adecuado para las dos cabezas que conforman el recipiente, partiendo de las recomendaciones de la UG-16 para espesores mínimos, así como su presión máxima de trabajo admisible. Existen tres tipos de cabezas utilizadas comúnmente, para su selección ver el Anexo 6. El espesor en primera instancia dominante en las cabezas es el hallado para los cilindros del cuerpo, debido al proceso de rebordeado este espesor se reducirá a 0,45 in.

#### Muestra de cálculo para la cabeza #1

- Tipo: Cabeza Toriesférica (Flanged & Dished).
- Material: SA – 516 70
- Presión interna de diseño:  $P = 100$  psi; 250 °F
- Presión externa de diseño:  $P_o = 15$  psi; 150 °F
- Corrosión interna admisible: 0,125 in
- Material: SA – 516 70
- Datos de Tabla 3
- Diámetro interno: 60 in

- Presión hidrostática en la cabeza #2: 13,63 psi
- Radiografía:
- Juntas categoría A - Full (Tipo 1)
- Junta circunferencial, entre cuerpo y tapa - Spot (Tipo 1)

### 3.3.2.1 *Espesor de diseño para la presión interna bajo corrosión*

$$M = \frac{1}{4} \left[ 3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right] \quad (64)$$

$$= \frac{1}{4} \left( 3 + \sqrt{\frac{(48,125 \text{ in})}{(9,725 \text{ in})}} \right) = 1,3061$$

$$t = \frac{PLM}{2SE - 0,2P} + CA \quad (65)$$

$$= \frac{(100 \text{ psi})(48,125 \text{ in})(1,3061)}{2(20\,000 \text{ psi})(1) - 0,2(100 \text{ psi})} + 0,125 \text{ in} = 0,28 \text{ in}$$

### 3.3.2.2 *Presión máxima de trabajo admisible bajo corrosión*

$$P_{MAWP} = \frac{2SEt_r}{LM + 0,2t_r} - P_s \quad (66)$$

$$= \frac{2(20\,000 \text{ psi})(1)(0,375 \text{ in})}{(48,125 \text{ in})(1,3061) + 0,2(0,375 \text{ in})} - 0 = 237,64 \text{ psi}$$

### 3.3.2.3 *Presión máxima admisible, nuevo*

$$MAP = \frac{2SEt_c}{LM + 0,2t_c} - P_s \quad (67)$$

$$= \frac{(2)(20\,000 \text{ psi})(1)(0,5 \text{ in})}{(48,125 \text{ in})(1,3061) + 0,2(0,5 \text{ in})} - 0 = 317,68 \text{ psi}$$

- **Espesor de diseño para la presión externa, bajo corrosión**

$$A = \frac{0,125t_a}{R_o} \quad (68)$$

$$= \frac{0,125(0,1371 \text{ in})}{48,5 \text{ in}} = 0,000353$$

$$B = 5\,193,91 \text{ psi}$$

$$P_a = \frac{Bt_a}{R_o} \quad (69)$$

$$= \frac{(5\,193,91 \text{ psi})(0,1371 \text{ in})}{(48,5 \text{ in})} = 15 \text{ psi}$$

$$t = 0,1371 \text{ in} + 0,125 \text{ in} = 0,2621 \text{ in}$$

- **Verificación**

$$t = \frac{1,67P_eLM}{2SE - 0,2(1,67P_e)} + CA \quad (70)$$

$$= \frac{1,67(15 \text{ psi})(48,125 \text{ in})(1,3061)}{2(20\,000 \text{ psi})(1) - 0,2(1,67)(15 \text{ psi})} + 0,125 \text{ in} = 0,1644 \text{ in}$$

- **Presión externa máxima admisible bajo corrosión y a 150 °F**

$$A = \frac{0,125t_a}{R_o} = \frac{0,125(0,325 \text{ in})}{48,5 \text{ in}} = 0,000838$$

$$B = 11\,743,12 \text{ psi}$$

$$P_a = \frac{Bt_a}{R_o} = \frac{(11\,743,12 \text{ psi})(0,325 \text{ in})}{(48,5 \text{ in})} = 78,69 \text{ psi}$$

- **Verificación**

$$P = \frac{2SEt}{1,67(LM + 0,2t)} + P_s \quad (71)$$

$$= \frac{2(20\,000 \text{ psi})(1)(0,325 \text{ in})}{(1,67)(48,125 \text{ in})(1,3061) + 0,2(0,325 \text{ in})(1,67)} + 0 = 123,72 \text{ psi}$$

Se tomará el MAEP de 78,69 psi

- **% de elongación de fibras extremas, según UCS-79(d)**

$$EFE = \frac{75t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right) \quad (72)$$

$$= \frac{75(0,5 \text{ in})}{9,85 \text{ in}} \left( 1 - \frac{9,85 \text{ in}}{\infty} \right) = 3,81\%$$

No excede el 5% entonces el espesor es adecuado

Dónde;

$t_r$  = Espesor comercial menos la corrosión admisible, en in.

$t_c$  = Espesor comercial, en in.

$P_d$  = presión de diseño, en psi.

$t_a$  = Espesor asumido, en in.

$L$  = Radio de corona, en in.

**3.3.3 Bocas.** Se calculará y verificará el espesor adecuado para las tuberías y refuerzos que conformarán las distintas bocas en el recipiente, además de las áreas requeridas y disponibles que implican el acople de una boca (UG-37), se analizarán las cargas de corte y tensión presentes en las soldaduras (UG-41), así como su correcto dimensionamiento (UG-16). Se analizarán las áreas y cargas máximas en soldaduras.. Este procedimiento de cálculo se realizará en 3 diferentes condiciones: bajo la presión interna MAWP, MAP y MAEP. La nomenclatura y disposición de sueldas se describe en el Anexo 28.

**3.3.3.1 Cálculo de la presión de trabajo máxima admisible (MAWP).** El procedimiento de cálculo se describe en el flujograma del Anexo 45.

Muestra de cálculo del MAWP de la boca B5

- Longitud  $Leg_{41}$  : 0,25
- Longitud  $Leg_{42}$  : 0,1875

- Longitud  $Leg_{43}$ : 0
- Esfuerzo admisible de tubería  $S_n$ : 17 100 psi
- Espesor de la placa de refuerzo  $t_e$ : 0,5 in
- Espesor del recipiente  $t$ : 0.5 in
- Diámetro interno del recipiente  $D_i$ : 60 in
- Diámetro interno de la boca  $d_n$ : 23 in
- Espesor de la boca  $t_n$ : 0,5 in
- Radio de la proyección de boca  $d_n$ : 11,5 in
- Factor E: 1
- Longitud del cuerpo del recipiente a la tubería  $L_{pr1}$ : 4,02 in
- Ancho de la placa de refuerzo W: 3,75 in

$$S_{per} = 1,5S_nE \quad (73)$$

$$= 1,5(17\ 100\ \text{psi})(1) = 25\ 650\ \text{psi}$$

$$R_{eff} = \frac{D_i}{21} \quad (74)$$

$$= \frac{60\ \text{in}}{21} = 2,857\ \text{in}$$

Para el cálculo de  $t_{eff}$  si se cumplen las ecuaciones 75 y 76 se utilizará la ecuación 77, de lo contrario su valor será de 1.

$$t_e \geq 0,5t \quad (75)$$

$$0,5 \geq 0,5(0,5)$$

$$0,5 \geq 0,25 \quad (\text{verdadero})$$

$$W \geq 8(t + t_e) \quad (76)$$

$$3,75\ \text{in} \geq 8(0,5 + 0,5)$$

$$3,75 \geq 8 \quad (\text{falso})$$

$$t_{eff} = t + t_e \quad (77)$$

Dado que las ecuaciones 75 y 76 no se cumplen  $t_{\text{eff}} = 1$

$$t_e < 0,5t \quad (78)$$

$$0,5 < 0,5(0,5)$$

$$0,5 < 0,25 \quad (\text{falso})$$

$$W < 2t \quad (79)$$

$$3,75 < 2(0,5)$$

$$3,75 < 1 \quad (\text{falso})$$

$$W < 8(t + t_e) \quad (80)$$

$$3,75 \text{ in} < 8(0,5 + 0,5)$$

$$3,75 < 8 \quad (\text{verdadero})$$

Dado que las ecuaciones 75 y 80 se cumplen se utilizará la ecuación 82

$$L_R = 8t \quad (81)$$

$$L_R = 10t \quad (82)$$

$$L_R = 10(0,5) = 5$$

$$L_R = 8(t + t_e) \quad (83)$$

Se tomará el menor valor de  $L_H$

$$L_{H1} = t + 0,78\sqrt{R_n t_n} \quad (84)$$

$$L_{H1} = 0,5 + 0,78\sqrt{(11,5)(0,5)} = 2,37$$

$$L_{H2} = L_{pr1} + t \quad (85)$$



$$L_{H2} = 4,02 + 0,5 = 4,52$$

$$L_{H3} = 8(t + t_e) \quad (86)$$

$$L_{H3} = 8(0,5 + 0,5) = 8$$

$$\lambda = \min \left[ \frac{(d_n + t_n)}{\sqrt{(D_i + t_{eff})t_{eff}}}, 10 \right] \quad (87)$$

$$= \min \left[ \frac{(23 + 0,5)}{\sqrt{(60 + 1)1}}, 10 \right] = 3$$

$$A_1 = tL_R \max \left( \frac{\lambda}{4}, 1 \right) \quad (88)$$

$$= (0,5)(5) \max \left( \frac{3}{4}, 1 \right) = 2,5 \text{ in}^2$$

Dado que se cumple la ecuación 89 se utilizará la ecuación 90

$$L_H \leq L_{pr1} + t \quad (89)$$

$$2,38 \leq 4,02 + 0,5$$

$$2,38 \leq 4,52 \quad (\text{verdadero})$$

$$A_2 = t_n L_H \quad (90)$$

$$= (0,5)(2,37) = 1,185 \text{ in}^2$$

$$A_2 = t_n (L_{pr3} + t) + 0,78 \left( \frac{t_{n2}^2}{t_n} \right) \sqrt{R_n t_{n2}} \quad (91)$$

$$A_{41} = 0,5 L_{41}^2 \quad (92)$$

$$= 0,5(0,25)^2 = 0,03 \text{ in}^2$$

$$A_{42} = 0,5 L_{42}^2 \quad (93)$$

$$= 0,5(0,1875)^2 = 0,02 \text{ in}^2$$

$$A_{5a} = Wt_e \quad (94)$$

$$= (3,75)(0,5) = 1,875 \text{ in}^2$$

$$A_{5b} = L_R t_e \quad (95)$$

$$= (5)(0,5) = 2,5 \text{ in}^2$$

$$A_5 = \min[A_{5a}, A_{5b}] \quad (96)$$

$$A_5 = 1,875 \text{ in}^2$$

$$A_T = A_1 + A_2 + A_3 + A_{41} + A_{42} + A_{43} + A_5 \quad (97)$$

$$A_T = 2,5 + 1,185 + 0 + 0,03 + 0,02 + 0 + 1,875 = 5,61$$

$$A_p = R_n(L_H - t) + R_{\text{eff}}(L_R + t_n + R_{nc}) \quad (98)$$

$$= 11,5(2,37 - 0,5) + 2,857(5 + 0,5 + 11,5) = 70,07$$

$$P_{\max 1} = \frac{S_{\text{per}}}{2 \left( \frac{A_p}{A_T} \right) - \left( \frac{R_{\text{eff}}}{t_{\text{eff}}} \right)} \quad (99)$$

$$= \frac{25\,650 \text{ psi}}{2 \left( \frac{70,07}{5,61} \right) - \left( \frac{2,857}{1} \right)} = 173,93 \text{ psi}$$

$$P_{\max 2} = S \left( \frac{t}{R_{\text{eff}}} \right) \quad (100)$$

$$= (17\,100 \text{ psi}) \left( \frac{0,5}{2,857} \right) = 2\,992,65 \text{ psi}$$

$$P_{\max} = \min[P_{\max 1}, P_{\max 2}] \quad (101)$$

$$P_{\max} = 173,93 \text{ psi}$$

Con el presente procedimiento se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 8: MAWP en bocas

Descripción	MAWP(psi)
B1	231,10
B2	251,39
B3	206,60
B4	206,60
B5	173,93

Fuente: El autor

**3.3.3.2 Cálculo de refuerzos bajo presión interna.** Se analizará con la presión resultado de sumar la MAWP en la tubería y la presión hidrostática debido al fluido.

Muestra de cálculo para la boca B5, cálculos bajo el MAWP

- Material de la boca: SA - 106 B Smls pipe
- Tipo de boca: NPS 24 Sch XS
- Tipo de brida: NPS 24 Clase 150 SO A105
- Presión estática del líquido:  $P = 12,54$  psi
- Eficiencia de la junta longitudinal en la boca: 1
- Ubicación: Cilindro #5
- Corrosión admisible: 0,125 in
- Datos de Tabla 4 y 5
- Diámetro interno: 23 in
- Diámetro del anillo de refuerzo: 31,5 in
- Distancia a la línea de referencia Datum: 24 in
- Espesor nominal de tubería: 0,5 in
- Radiografía: Junta circunferencial, Full (Tipo 1)
- Esfuerzo admisible del cuerpo: 20 000 psi
- Esfuerzo admisible de la boca: 17 100 psi

- **Límite paralelo de reforzamiento UG-40**

$$L_R = \text{MAX}[d, R_n + (t_n - C_n) + (t - C)] \quad (102)$$

$$= \text{MAX}[23,25, 11,625 + (0,5 - 0,125) + (0,5 - 0,125)] = 23,25 \text{ in}$$

- **Límite exterior normal de reforzamiento UG-40**

$$L_H = \text{MIN}[2,5(t - C), \quad 2,5(t_n - C_n) + t_e] \quad (103)$$

$$= [2,5(0,5 - 0,125), 2,5(0,5 - 0,125) + 0,5] = 0,9375 \text{ in}$$

- **Espesor de boca requerido UG-27- c-1**

$$t_m = \frac{PR_n}{S_N E - 0,6P} \quad (104)$$

$$= \frac{(186,47 \text{ psi})(11,625 \text{ in})}{(17\,100 \text{ psi})(1) - 0,6(186,47 \text{ psi})} = 0,1276 \text{ in}$$

- **Espesor requerido UG-37- a**

$$t_r = \frac{PR}{S_V E - 0,6P} \quad (105)$$

$$= \frac{(186,47 \text{ psi})(30,125 \text{ in})}{(20\,000 \text{ psi})(1) - 0,6(186,47 \text{ psi})} = 0,2824 \text{ in}$$

- **Área requerida UG-37- c**

$$f_{r1} = \text{menor entre } 1 \text{ y } \frac{S_N}{S_V} \quad (106)$$

$$= \frac{17\,100 \text{ psi}}{20\,000 \text{ psi}} = 0,855$$

$$f_{r2} = \text{menor entre } 1 \text{ y } \frac{S_N}{S_V} \quad (107)$$

$$= \frac{17\,100 \text{ psi}}{20\,000 \text{ psi}} = 0,855$$

$$f_{r3} = \text{menor entre } f_{r2} \text{ o } \frac{S_P}{S_V} \quad (108)$$

$$= \frac{17\,100 \text{ psi}}{20\,000 \text{ psi}} = 0,855$$

$$f_{r4} = \text{menor entre } 1 \text{ y } \frac{S_P}{S_V} \quad (109)$$

$$= \frac{17\,100 \text{ psi}}{20\,000 \text{ psi}} = 0,855 = 1$$

$$A = d t_r F + 2 t_n t_r F (1 - f_{r1}) \quad (110)$$

$$= (23,25)(0,28)(1) + 2(0,375)(0,28)(1)(1 - 0,85) = 6,6 \text{ in}^2$$

- **Área disponible Fig. UG-37.1**

Se tomará el valor máximo de entre las siguientes ecuaciones

$$A_1 = d(E_1 t - F t_r) - 2 t_n (E_1 t - F t_r)(1 - f_{r1}) \quad (111)$$

$$= 23,25[(0,375) - (0,28)] - 2(0,375)[(0,375) - (0,28)](1 - 0,855) = 2,14 \text{ in}^2$$

$$A_1 = 2(t + t_n)(E_1 t - F t_r) - 2 t_n (E_1 t - F t_r)(1 - f_{r1}) \quad (112)$$

$$= 2(0,37 + 0,37)(0,37 - 0,28) - 2(0,37)(0,37 - 0,28)(1 - 0,85) = 0,13 \text{ in}^2$$

Se tomará el valor de  $A_1 = 2,14 \text{ in}^2$

Se tomará el valor mínimo de entre las siguientes ecuaciones

$$A_2 = 5(t_n - t_m)f_{r2}t \quad (113)$$

$$= 5(0,375 - 0,1276)(0,855)(0,375) = 0,4 \text{ in}^2$$

$$A_2 = 2(t_n - t_m)(2,5t_n + t_e)f_{r2} \quad (114)$$

$$= 2(0,375 - 0,127)[2,5(0,375) + 0,5]0,85 = 0,61 \text{ in}^2$$

Se tomará el valor de  $A_2 = 0,4 \text{ in}^2$

$$A_{41} = \text{Leg}^2 f_{r3} \quad (115)$$

$$= (0,4961)^2(0,855) = 0,2104 \text{ in}^2$$

$$A_{42} = \text{Leg}^2 f_{r4} \quad (116)$$

$$= (0,5)^2(1) = 0,25 \text{ in}^2$$

$$A_5 = (D_p - d - 2t_n)t_e f_{r4} \quad (117)$$

$$= [31,5 - 23,25 - 2(0,375)](0,5)(1) = 3,75 \text{ in}^2$$

$$A_T = A_1 + A_2 + A_{41} + A_{42} + A_5 \quad (118)$$

$$= 2,14 + 0,4 + 0,21 + 0,25 + 3,75 = 6,75 \text{ in}^2$$

El área total debe ser mayor que la requerida y ya que  $6,75 \text{ in}^2 \geq 6,6 \text{ in}^2$  se concluye que el refuerzo es adecuado.

- *Verificación de soldadura UG-16-c-2*

- **Filete interior**

$$t_{\min} = \text{menor entre } 0,75, t_n \text{ y } t_e \quad (119)$$

$$t_{\min} = 0,375 \text{ in}$$

$$t_{c(\min)} = \text{menor entre } 0,25 \text{ o } 0,7t_{\min} \quad (120)$$

$$t_{c(\min)} = 0,25 \text{ in}$$

$$t_{c(\text{actual})} = 0,7\text{Leg} \quad (121)$$

$$= 0,7(0,5) = 0,35 \text{ in}$$

- **Filete exterior**

$$t_{\min} = \text{menor entre } 0,75, t_e \text{ y } t \quad (122)$$

$$t_{\min} = 0,375 \text{ in}$$

$$t_{w(\min)} = 0,5t_{\min} \quad (123)$$

$$= 0,5(0,37) = 0,1875 \text{ in}$$

$$t_{w(\text{actual})} = 0,7L_{\text{eg}} \quad (124)$$

$$= 0,7(0,5) = 0,35 \text{ in}$$

- **Verificación de espesor en cuello de boca UG-45**

$$t_{aUG-27} = \frac{PR_n}{S_N E - 0,6P} + \text{Corrosión} \quad (125)$$

$$= \frac{(186,47 \text{ psi})(11,625 \text{ in})}{17\,100 \text{ psi} - 0,6(186,47 \text{ psi})} + 0,125 \text{ in} = 0,253 \text{ in}$$

$$t_a = \max(t_{aUG-27}, t_{aUG-22}) \quad (126)$$

$$= \max(0,185, 0) = 0,253 \text{ in}$$

$$t_{b1} = \frac{PR}{S_v E - 0,6P} + \text{Corrosión} \quad (127)$$

$$= \frac{(186,47 \text{ psi})(30,125 \text{ in})}{20\,000 \text{ psi} - 0,6(186,47 \text{ psi})} + 0,125 \text{ in} = 0,41 \text{ in}$$

$$t_{b1} = \max(t_{b1}, t_{bUG-16}) \quad (128)$$

$$= \max(0,41, 0,185) = 0,41 \text{ in}$$

$$t_b = \min(t_{b3}, t_{b1}) \quad (129)$$

$$= \min(0,444, 0,41) = 0,41 \text{ in}$$

$$t_{UG-45} = \max(t_a, t_b) \quad (130)$$

$$= \max(0,185, 0,41) = 0,41 \text{ in}$$

$$t_n = 0,875t_e \quad (131)$$

$$= 0,875(0,5) = 0,4375 \text{ in}$$

Dónde;

$d$  = Diámetro interno de la boca, en in.

$R_n = R_{nc}$  = Radio interno de la boca, en in.

$t_n$  = Espesor de la boca, en in.

$t$  = Espesor, en in.

$t_e$  = Espesor comercial de la boca, en in.

$t_a$  = Espesor mínimo requerido en la boca, en in.

$t_{b3}$  = Corrosión sumada al espesor dado por el Anexo 29, en in.

$C_n$  = Corrosión admisible en la boca, en in.

$C$  = Corrosión admisible, en in.

$S_N$  = Esfuerzo admisible en la boca, en psi.

$P$  = Suma entre la MAWP en la tubería y la presión hidrostática debido al fluido., en psi.

$S_V$  = Esfuerzo admisible del recipiente, en psi.

$S_p$  = Esfuerzo admisible del refuerzo o Pad, en psi.

$F$  = Factor (Anexo 27).

$E$  = Coeficiente debido al tipo de junta.

$W$  = Ancho de la placa de refuerzo, en in.

$Leg$  = Dimensión recomendada en cordón de soldadura (Anexo 28), en in.

$R_{eff}$  = Radio efectivo de presión, en in.

$t_{eff}$  = Espesor efectivo de la boca, en in.

- **Esfuerzos admisibles en juntas soldadas UG-15-c**

$$S_g = 0,74S_V \quad (132)$$

$$= 0,74(20\,000 \text{ psi}) = 14\,800 \text{ psi}$$

$$S_n = 0,7S_N \quad (133)$$

$$= 0,7(17\,100 \text{ psi}) = 11\,970 \text{ psi}$$



$$S_i = 0,49S_N \quad (134)$$

$$= 0,49(17\,100 \text{ psi}) = 8\,379 \text{ psi}$$

$$S_o = 0,49S_V \quad (135)$$

$$= 0,49(20\,000 \text{ psi}) = 9\,800 \text{ psi}$$

- **Resistencia de las juntas soldadas**

$$R_1 = \frac{\pi D E_N \text{Leg} S_i}{2} \quad (136)$$

$$= \frac{\pi(24 \text{ in})(0,5 \text{ in})(8\,379 \text{ psi})}{2} = 157\,940,43 \text{ lbf}$$

$$R_2 = \frac{\pi D E_R \text{Leg} S_o}{2} \quad (137)$$

$$= \frac{\pi(31,5 \text{ in})(0,5 \text{ in})(9\,800 \text{ psi})}{2} = 23\,090,06 \text{ lbf}$$

$$R_3 = \frac{\pi D M_N t_n S_n}{2} \quad (138)$$

$$= \frac{\pi(23,625 \text{ in})(0,375 \text{ in})(11\,970 \text{ psi})}{2} = 166\,577,8 \text{ lbf}$$

$$R_4 = \frac{\pi D E_N t_w S_g}{2} \quad (139)$$

$$= \frac{\pi(24 \text{ in})(0,375 \text{ in})(14\,800 \text{ psi})}{2} = 209\,230,07 \text{ lbf}$$

$$R_5 = \frac{\pi D E_N t_e S_g}{2} \quad (140)$$

$$= \frac{\pi(24 \text{ in})(0,5 \text{ in})(14\,800 \text{ psi})}{2} = 278\,973,43 \text{ lbf}$$

- **Cargas en soldaduras UG-41-b-1**

$$W = S_V[A - A_1 + 2t_n f_{r1}(E_1 t - F_{t_r})] \quad (141)$$

$$= 20\,000\{6,6 - 2,14 + 2(0,375)(0,855)[(1)(0,375) - (1)(0,2824)]\} = 90\,387,6 \text{ lbf}$$

$$W_{1-1} = S_V(A_2 + A_5 + A_{41} + A_{42}) \quad (142)$$

$$= 20\,000(0,4 + 3,75 + 0,2104 + 0,25) = 92\,208 \text{ lbf}$$

$$W_{2-2} = S_V(A_2 + A_3 + A_{41} + A_{43} + 2t_n f_{r1}) \quad (143)$$

$$= 20\,000[0,4 + 0 + 0,2104 + 0 + 2(0,375)(0,375)(0,855)] = 17\,017,38 \text{ lbf}$$

$$W_{3-3} = S_V(A_2 + A_3 + A_5 + A_{41} + A_{42} + A_{43} + 2t_n f_{r1}) \quad (144)$$

$$= 20\,000[0,4 + 0 + 3,75 + 0,21 + 0,25 + 0 + 2(0,375)(0,375)(0,855)] = 97\,017,38 \text{ lbf}$$

- Carga para el refuerzo 1-1 la menor entre W y  $W_{1-1}$

Refuerzo 1-1 será la suma de la ecuación  $R_2$  y  $R_3$

Si el refuerzo 1-1 es mayor que W entonces es aceptable según la UG-41-(b)-2

$$W = 90\,387,6 \text{ lbf}$$

$$\text{Refuerzo}_{1-1} = R_2 + R_3 = 230\,907,06 + 166\,577,8 = 397\,484,86 \text{ lbf}$$

Dado que  $\text{Refuerzo}_{1-1} \geq W$ , entonces es aceptable

- Carga para el refuerzo 2-2 la menor entre W y  $W_{2-2}$

Refuerzo 2-2 será la suma de la ecuación  $R_1$ ,  $R_4$  y  $R_5$

Si el refuerzo 2-2 es mayor que  $W_{2-2}$  entonces es aceptable según la UG-41-(b)-1

$$W_{2-2} = 17\,017,38 \text{ psi}$$

$$\text{Refuerzo}_{2-2} = R_1 + R_4 + R_5 = 157\,940,4 + 209\,230,07 + 27\,8973,4 = 646\,143,93 \text{ lbf}$$

Dado que  $\text{Refuerzo}_{2-2} \geq W_{2-2}$ , entonces es aceptable

- Carga para el refuerzo 3-3 la menor entre W y  $W_{3-3}$

Refuerzo 3-3 será la suma de la ecuación  $R_2$  y  $R_4$

Si el refuerzo 3-3 es mayor que W entonces es aceptable según la UG-41-(b)-2

$$W = 90387.6 \text{ lbf}$$

$$\text{Refuerzo}_{3-3} = R_2 + R_4 = 230\,907.06 + 209\,230.07 \text{ lbf} = 440\,137.13 \text{ lbf}$$

Dado que  $\text{Refuerzo}_{3-3} \geq W$ , entonces es aceptable

- **Verificación de áreas según el apéndice 1-7 de la norma ASME**

Aplica para bocas con un diámetro interno superior a 20 in. Las áreas se calcularán de manera similar a las detalladas anteriormente. La nueva área calculada deberá ser mayor a  $A_r$  para una verificación satisfactoria.

- Se reducirá el área inicial a menos de un 75%

$$A_r = \frac{2}{3} A \quad (145)$$

$$= \frac{2}{3} (6.6 \text{ in}^2) = 4.4 \text{ in}^2$$

- Se calculará  $A_1$  con los mismos criterios anteriores y con la siguiente ecuación

$$A_1 = (2d_r - d)(E_t - F_{t_r}) - 2t_n(E_t - F_{t_r})(1 - f_{r1}) \quad (146)$$

$$= [2(17.43) - 23.25](0.375 - 0.28) - 2(0.375)(0.375 - 0.28)(1 - 0.85) = 1.066 \text{ in}^2$$

Se tomará el valor de  $A_1 = 1.066 \text{ in}^2$

$$A_T = A_1 + A_2 + A_{41} + A_{42} + A_5 = 1.066 + 0.4 + 0.21 + 0.25 + 3.75 = 5.68 \text{ in}^2$$

Ya que  $5,68 \text{ in}^2 \geq 4,4 \text{ in}^2$  se concluye que el refuerzo es adecuado

Dónde;

$S_g$  = Soldadura en surco inferior y superior bajo tensión, en psi.

$S_n$  = Pared de boca bajo corte, en psi.

$S_i$  = Filete de suelda inferior bajo corte, en psi.

$S_o$  = Filete de suelda exterior bajo corte, en psi.

$DE_N$  = Diámetro exterior de la boca, en in.

$DE_R$  = Diámetro exterior del refuerzo, en in.

$DM_N$  = Diámetro medio de la boca, en in.

$t_w$  = Espesor de suelda, en in.

$d_r$  = Diámetro de boca reducida al 75 %, en in.

Tabla 9: Cálculos de áreas y espesores bajo el MAWP de la boca B5

Cálculo de Áreas (in <sup>2</sup> )							Espesores en bocas (in)	
A(req)	A(dis)	A1	A2	A3	A5	A(sold)	t(req)	t(mín)
6,6	6,75	2,14	0,4	0	3,75	0,46	0,253	0,437

Fuente: El autor

Tabla 10: Análisis de cargas en soldaduras bajo el MAWP de la boca B5

Cargas en soldaduras(lbf)						
Carga W	Carga W <sub>1-1</sub>	Resistencia Refuerzo 1-1	Carga W <sub>2-2</sub>	Resistencia Refuerzo 2-2	Carga W <sub>3-3</sub>	Resistencia Refuerzo 3-3
90 387,6	92 208	397 484,86	17 017,38	646 143,93	97 017,38	440 137,13

Fuente: El autor

Tabla 11: Cálculos del dimensionamiento de suelda bajo el MAWP de la boca B5

Dimensionamiento de sueldas(in)			
Descripción de suelda	Dimensión de suelda requerida	Dimensión de suelda actual	Situación
Filete boca – refuerzo (Leg41)	0,25	0,35	Aceptable
Filete refuerzo – cuerpo (Leg42)	0,1875	0,35	Aceptable
Cordón superior en ranura boca-refuerzo	0,2625	0,5	Aceptable

Fuente: El autor

### 3.3.3.3 Muestra de cálculo para la boca B5, cálculos bajo el MAP

- Material de la boca: SA - 106 B Smls pipe
- Tipo de boca y brida: NPS 24 Clase 150 SO A105; NPS 24 Sch XS
- Presión estática del líquido:  $P = 12,54 \text{ psi}$

- Eficiencia de la junta longitudinal en la boca: 1
- Ubicación: Cilindro #5
- Corrosión admisible: 0,125 in
- Datos de Tabla 4 y 5
- MAP: 233,38 psi
- Diámetro interno: 23 in
- Diámetro del anillo de refuerzo: 31,5 in
- Distancia a la línea de referencia Datum: 24 in
- Espesor nominal de tubería: 0,5 in
- Radiografía: Junta circunferencial, Full (Tipo 1)
- Esfuerzo admisible del cuerpo: 20 000 psi
- Esfuerzo admisible de la boca: 17 100 psi
- Esfuerzo admisible del refuerzo: 20 000 psi

Tabla 12: Cálculos de áreas y espesores bajo el MAP de la boca B5

Cálculo de Áreas (in <sup>2</sup> )							Espesores en bocas (in)	
A(req)	A(dis)	A1	A2	A3	A5	A(sold)	t(req)	t(mín)
7,866	7,91	3,66	0,7128	0	3,75	0,463	0,1625	0,437

Fuente: El autor

Tabla 13: Análisis de cargas en soldaduras bajo el MAP de la boca B5

Cargas en soldaduras(lbf)						
Carga W	Carga W <sub>1-1</sub>	Resistencia Refuerzo 1-1	Carga W <sub>2-2</sub>	Resistencia Refuerzo 2-2	Carga W <sub>3-3</sub>	Resistencia Refuerzo 3-3
86 859,6	84 132	451 835,63	27 682	715 887,28	92 682	509 880,49

Fuente: El autor

Tabla 14: Cálculos del dimensionamiento de suelda bajo el MAP de la boca B5

Dimensionamiento de sueldas(in)			
Descripción de suelda	Dimensión de suelda requerida	Dimensión de suelda actual	Situación
Filete boca – refuerzo (Leg41)	0,25	0,35	Aceptable
Filete refuerzo – cuerpo (Leg42)	0,25	0,35	Aceptable
Cordón superior en ranura boca-refuerzo	0,35	0,5	Aceptable

Fuente: El autor

### 3.3.3.4 Muestra de cálculo para la boca B5, cálculos bajo la MAEP

- Material de la boca: SA - 106 B Smls pipe
- Tipo de boca: NPS 24 Sch XS

- Tipo de brida: NPS 24 Clase 150 SO A105
- Presión estática del líquido:  $P = 12,54$  psi
- Eficiencia de la junta longitudinal en la boca: 1
- Ubicación: Cilindro #5
- Corrosión admisible: 0,125 in
- Datos de Tabla 4 y 5
- MAEP: 20,37 psi
- Diámetro interno: 23 in
- Diámetro del anillo de refuerzo: 31,5 in
- Distancia a la línea de referencia Datum: 24 in
- Espesor nominal de tubería: 0,5 in
- Radiografía: Junta circunferencial, Full (Tipo 1)
- Esfuerzo admisible del cuerpo: 20 000 psi
- Esfuerzo admisible de la boca: 17 100 psi
- Esfuerzo admisible del refuerzo: 20 000 psi

Tabla 15: Cálculos de áreas y espesores bajo el MAEP de la boca B5

Cálculo de Áreas (in <sup>2</sup> )							Espesores en bocas (in)	
A(req)	A(dis)	A1	A2	A3	A5	A(sold)	t(req)	t(mín)
4,218	4,246	0,285	0,51	0	3,75	0,463	0,191	0,437

Fuente: El autor

Tabla 16: Cálculos del dimensionamiento de suelda bajo el MAEP de la boca B5

Dimensionamiento de sueldas(in)			
Descripción de suelda	Dimensión de suelda requerida	Dimensión de suelda actual	Situación
Filete boca – refuerzo (Leg41)	0,25	0,35	Aceptable
Filete refuerzo – cuerpo (Leg42)	0,1875	0,35	Aceptable
Cordón superior en ranura boca-refuerzo	0,2625	0,5	Aceptable

Fuente: El autor

**3.3.4 Anillo de refuerzo.** Se calculará la presión de trabajo máxima admisible que soportaría el anillo, además de los momentos de inercia requerido y disponible que figuran en su eje axial paralelo al del recipiente según la UG-29-a. Se verificarán las soldaduras que acoplarán al anillo según la UG-30, y se analizarán las dimensiones requeridas del filete de suelda para que pueda resistir la presión radial y corte.

- Tipo de anillo: Flat Bar (platina)
- Material del anillo: SA - 516 70
- Dimensiones del anillo: 3/8x3,5 in

- Presión externa: 15 psi
- Ubicación del anillo: exterior
- Corrosión admisible: 0
- Distancia al extremo superior: 198,26 in
- Distancia del Datum al anillo: 187,06 in
- Esfuerzo admisible del material: 20 000 psi

- *Anillo sometido al MAEP*

$$\frac{L}{D_o} \quad (147)$$

$$= \frac{198,26 \text{ in}}{61 \text{ in}} = 3,25$$

$$\frac{D_o}{t} \quad (148)$$

$$= \frac{61 \text{ in}}{0,33 \text{ in}} = 184,40$$

$$A = 0,000164; B = 2\,112 \text{ psi}$$

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} \quad (149)$$

$$= \frac{4(2\,112 \text{ psi})}{3(61 \text{ in}/0,33 \text{ in})} = 15,27 \text{ psi}$$

$$A_s = bh = (0,375 \text{ in})(3,5 \text{ in}) = 0,3125 \text{ in}^2$$

$$B = \frac{0,75PD_o}{t + \left(\frac{A_s}{L_s}\right)} \quad (150)$$

$$= \frac{0,75(15 \text{ psi})(61 \text{ in})}{0,33 \text{ in} + (0,3125 \text{ in}^2 / 198,26 \text{ in})} = 2\,069,66 \text{ psi}$$

Encontrando el nuevo factor

$$A = 0,000161$$

### 3.3.4.1 Momento de inercia teórico y requerido UG-29

El momento teórico tiene que ser mayor al calculado.

$$I'_s = \frac{D_o^2 L_s A \left( t + \frac{A_s}{L_s} \right)}{10,9} \quad (151)$$

$$= \frac{(61)^2 (198,26) (0,000161) (0,33 + 0,312/198,26)}{10,9} = 3,67 \text{ in}^4$$

$$I'_t = 1,10 \sqrt{D_o t_s} \quad (152)$$

$$= 1,10 \sqrt{(61 \text{ in})(0,5 \text{ in})} = 6,07 \text{ in}^4$$

$$I'_c = 4,31 \text{ in}^4$$

### 3.3.4.2 Verificación de sueldas en el anillo UG-30

- Cordón de suelda: Continuo a los dos lados
- Dimensión del filete: 0,25 in (dimensión mínima según UG-30-f-1)
- Dimensión del cuerpo en la ubicación de la suelda: 0,5 in
- Corrosión admisible en la ubicación de la suelda: 0,125 in
- Espesor del anillo en la ubicación de la suelda: 0,375 in

$$C_r = PL_s \quad (153)$$

$$= (15 \text{ psi})(198,26 \text{ in}) = 2\,973,9 \text{ lbf/in}$$

$$V = 0,01 PL_s D_o \quad (154)$$

$$= 0,01(15 \text{ psi})(198,26 \text{ in})(61 \text{ in}) = 1\,814,08 \text{ lbf}$$

$$Q = 1,5271 \text{ in}^3$$



$$q = \frac{VQ}{I'_c} \quad (155)$$

$$= \frac{(1\,814,08 \text{ lbf})(1,5271 \text{ in}^3)}{4,31 \text{ in}^4} = 642,76 \text{ lbf/in}$$

$$f_w = \sqrt{C_r^2 + q^2} \quad (156)$$

$$= \sqrt{(2\,973,9 \text{ lbf/in})^2 + (642,76 \text{ lbf/in})^2} = 3\,042,57 \text{ lbf/in}$$

$$S_w = 0,55S \quad (157)$$

$$= 0,55(20\,000 \text{ psi}) = 11\,000 \text{ psi}$$

- **Dimensión de filete requerido para resistir la presión radial y corte**

$$d_w = \frac{f_w(d_{ss} + d_s)}{S_w d_t} + \text{Corrosión} \quad (158)$$

$$= \frac{(3\,042,57 \text{ lbf/in})(1 + 0)}{(11\,000 \text{ psi})(2)} + 0 = 0,138 \text{ in}$$

La dimensión de filete de 0,25 in es adecuada para resistir el corte y la presión radial.

Dónde;

$S_w$  = Esfuerzo de admisible de soldadura UW-18-d, en psi.

$d_{ss}$  = Número de cordones de soldadura.

$d_s$  = Número de espacios entre cordones.

$d_t$  = Suma de cordones y espacios de soldadura.

$f_w$  = Fuerzas combinadas en soldadura, en lbf/in.

$Q$  = Primer momento de área, obtenido por software, en in<sup>3</sup>.

$I'_t$  = Momento de inercia teórico disponible entre el anillo y el cuerpo con respecto al eje paralelo axial del cuerpo, en in<sup>4</sup>.

$I'_c$  = Momento de inercia calculado disponible entre el anillo y el cuerpo con respecto al eje paralelo axial del cuerpo, en in<sup>4</sup>.

$I'_s$  = Momento de inercia requerido entre el anillo y el cuerpo con respecto al eje paralelo axial del cuerpo, en in<sup>4</sup>.

$q$  = Carga de corte en soldadura, lbf/in.

$V$  = Carga radial de corte, lbf.

$P$  = Presión externa, en psi.

$L_s$  = Distancia del anillo al extremo superior del recipiente, en in.

$D_o$  = Diámetro exterior del recipiente, en in.

$t$  = Espesor determinado en la iteración para el MAEP, en in.

$A_s$  = Área transversal del anillo de refuerzo sin las soldaduras, en in<sup>2</sup>.

**3.3.5 Faldón.** Se calculará el espesor adecuado para el anillo cilíndrico que conformará el soporte o faldón en condiciones de: operación, corroído y bajo carga de sismo. Debido a las cargas en la base y el peso por encima, el faldón se divide en dos regiones sometidas a compresión y tensión respectivamente. El acople con su base y el cuerpo del recipiente consta de dos tipos de juntas soldadas (Anexo 9), por esta razón se calculará el espesor en la base y parte alta del faldón. Debido a que en el código ASME no existe el marco teórico para el cálculo de este tipo de elementos, el análisis se basará en: (MEGYESY, 2008)

- Material del anillo: SA - 516 70
- Eficiencia de la junta soldada cabeza – faldón: 0,55
- Eficiencia de la junta soldada faldón – base: 0,8
- Eficiencia crítica por la altura del recipiente: 1
- Elemento de acople: Cabeza #2
- Corrosión admisible: 0,125 in
- Diámetro exterior del faldón: 60,75 in
  
- *Cargas debido a: sismo, operación y corrosión*

- **Tensión**

Espesor requerido bajo tensión en la parte inferior

$$t_t = \frac{-W}{\pi D S_t E} + \frac{48M}{\pi D^2 S_t E} \quad (159)$$
$$= \frac{-60\,542,9 \text{ lb}}{\pi(60,75 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(0,8)} + \frac{48(651\,902 \text{ lbft})}{\pi(60,75 \text{ in})^2(20\,000 \text{ psi})(0,8)} = 0,1489 \text{ in}$$

Espesor requerido bajo tensión en la parte superior

$$t_{ts} = \frac{-W}{\pi D S_t E} + \frac{48M}{\pi D^2 S_t E}$$

$$= \frac{-58\,922,57 \text{ lb}}{\pi(60,75 \text{ in})(20\,000 \text{ psi})(0,55)} + \frac{48(540\,204,8 \text{ lbft})}{\pi(60,75 \text{ in})^2(20\,000 \text{ psi})(0,55)} = 0,1752 \text{ in}$$

- **Compresión**

Espesor requerido bajo compresión en la parte inferior

$$t_c = \frac{(1 + A_v)W}{\pi D S_t E} + \frac{48M}{\pi D^2 S_c E} \quad (160)$$

$$= \frac{-(1,2)(60\,542,9 \text{ lb})}{\pi(60,75 \text{ in})(15\,058 \text{ psi})(1)} + \frac{48(651\,902 \text{ lbft})}{\pi(60,75 \text{ in})^2(15\,058 \text{ psi})(1)} = 0,2045 \text{ in}$$

Espesor requerido bajo compresión en la parte superior

$$t_{cs} = \frac{(1 + A_v)W}{\pi D S_t E} + \frac{48M}{\pi D^2 S_t E}$$

$$= \frac{-(1,2)(58\,922,57 \text{ lb})}{\pi(60,75 \text{ in})(15\,058 \text{ psi})(1)} + \frac{48(540\,204,8 \text{ lbft})}{\pi(60,75 \text{ in})^2(15\,058 \text{ psi})(1)} = 0,1731 \text{ in}$$

El espesor requerido más alto es el de 0,2045 in, sumando a este valor la corrosión tenemos 0,33 in. Por lo que se tomará el espesor comercial para el faldón de 0,625 in.

Dónde;

M = Momento flector en el lugar de análisis, en lbf-in.

w = Peso por encima del punto de análisis, en lbf.

S<sub>t</sub> = Esfuerzo admisible del material bajo tensión, en psi.

S<sub>c</sub> = Esfuerzo admisible del material bajo compresión, en psi.

E = Eficiencia de la suelda según su tipo de junta.

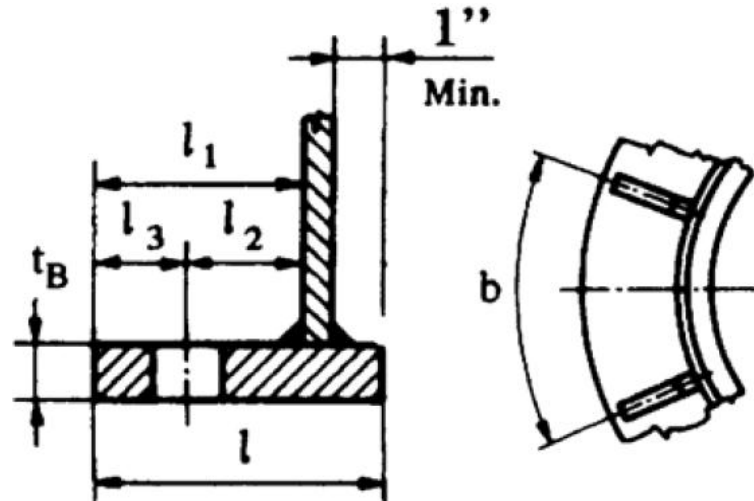
D = Diámetro externo del soporte, en in.

A<sub>v</sub> = Aceleración vertical.

**3.3.6 Base de faldón.** Se calculará la dimensión y el número de pernos de anclaje necesarios para la instalación segura del recipiente a presión. Además, se determinará

el ancho y el espesor del anillo base del faldón, bajo las condiciones más críticas posibles: operación, corroído y bajo carga de sismo. Debido a que en el código ASME no existe el marco teórico para el cálculo de este tipo de elementos, el cálculo se basará en: (MEGYESY, 2008)

Figura 24: Nomenclatura de la base del faldón



Fuente: (MEGYESY, 2008 pág. 81)

- Material del anillo: SA - 516 70
- Eficiencia de la junta soldada cabeza – faldón: 0,55
- Eficiencia de la junta soldada faldón – base: 0,8
- Eficiencia crítica por la altura del recipiente: 1
- Elemento de acople: Cabeza #2
- Corrosión admisible: 0,125 in
- Diámetro exterior del faldón: 60,75 in
- Cargas debido a: sismo, operación y corrosión
- Peso: 62 643,28 lbf
- Momento: 651 902 lbf-in
- Esfuerzo admisible en la plancha base: 20 000 psi
- Diámetro que describe la circunferencia de los pernos: 66,625 in
- Factor n: 10
- Esfuerzo admisible en el concreto: 1 200 psi
- Material del perno de anclaje: SA – 193 B 7
- Esfuerzo admisible del perno: 19 000 psi
- Diámetro exterior del anillo base: 74 in
- Diámetro interior del anillo base: 47 in

- Valor asumido de  $f_{cb}$ : 1 000 psi
- Valor asumido de  $S_a$ : 18 000 psi

Se asumirá un valor para:  $f_{cb}$ ,  $I$  y  $S_a$ , después se calculará  $k$  con los coeficientes:  $j$ ,  $C_t$ ,  $C_c$  y  $z$ ; obtenidos del Anexo 31. Finalmente se verificará que  $f_{cb}$  calculado sea próximo al asumido.

$$k = \frac{1}{1 + \frac{S_a}{nf_{cb}}} \quad (161)$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{18\,000 \text{ psi}}{(10)(1\,100)}} = 0,38$$

$$C_c = 1,715$$

$$C_t = 2,268$$

$$j = 0,784$$

$$z = 0,42$$

$$f_{cb} = \frac{2f_c k d}{2k d + I} \quad (162)$$

$$= \frac{2(1\,200 \text{ psi})(0,38)(66,625 \text{ in})}{2(0,38)(66,625 \text{ in}) + 13,5 \text{ in}} = 947,41 \text{ psi}$$

- **Área requerida de los pernos de anclaje**

$$B_t = \frac{2\pi(12M - Wzd)}{C_t S_a j d} \quad (163)$$

$$= \frac{2\pi[(12)(651\,902) - (62\,643,28)(0,42)(66,625)]}{(2,268)(18\,000)(0,784)(66,625)} = 17,88 \text{ in}^2$$

Dividiendo el área requerida para los doce pernos seleccionados se obtiene un área de raíz de  $1,49 \text{ in}^2$ . Posteriormente del Anexo 30 se seleccionó el perno superior más cercano incluyendo  $1/8$  por corrosión, resultando como perno óptimo el de  $1 \frac{3}{4} \text{ in}$  de diámetro.

- **Tensión en los pernos de anclaje**

$$F_t = \frac{M - WzD}{jD} \quad (164)$$

$$= \frac{651\,902 - (62\,643,28 \text{ lbf})(0,42)(5,55 \text{ ft})}{(0,784)(5,55 \text{ ft})} = 116\,262,3 \text{ lbf}$$

- **Esfuerzo de tensión en los pernos de anclaje**

$$t_s = \frac{B_t}{\pi d} \quad (165)$$

$$= \frac{17,88 \text{ in}^2}{\pi(66,625 \text{ in})} = 0,085 \text{ in}$$

$$S_a = \frac{F_t}{t_s r C_t} \quad (166)$$

$$= \frac{116\,262,3 \text{ lbf}}{(0,085 \text{ in})(33,31 \text{ in})(2,268)} = 18\,105,16 \text{ psi}$$

- **Carga compresiva en el concreto**

$$I_4 = I - t_s \quad (167)$$

$$= 13,5 \text{ in} - 0,085 \text{ in} = 13,415 \text{ in}$$

$$F_c = F_t + W \quad (168)$$

$$= 116\,262,3 \text{ lbf} + 62\,643,28 \text{ lbf} = 178\,905,59 \text{ lbf}$$

$$f_{cb} = \frac{F_c}{r C_e (I_4 + n t_s)} \quad (169)$$

$$= \frac{178\,905,59 \text{ lbf}}{(33,31 \text{ in})(1,715)[(13,415 \text{ in}) + (10)(0,085 \text{ in})]} = 219 \text{ psi}$$

Revisión de la constante k, calculada con los valores asumidos de  $f_{cb} = 1\,000\text{ psi}$  y  $S_a = 18\,000\text{ psi}$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{S_a}{nf_{cb}}} = \frac{1}{1 + \frac{18\,105,16\text{ psi}}{(10)(219\text{ psi})}} = 0,11$$

$$C_c = 0,891$$

$$C_t = 2,864$$

$$j = 0,767$$

$$z = 0,478$$

$$F_t = \frac{M - WzD}{jD} = \frac{651\,902 - (62\,643,28\text{ lbf})(0,478)(5,55\text{ ft})}{(0,767)(5,55\text{ ft})} = 114\,102,13\text{ lbf}$$

$$S_a = \frac{F_t}{t_s r C_t} = \frac{114\,102,13\text{ lbf}}{(0,085\text{ in})(33,31\text{ in})(2,864)} = 14\,071,07\text{ psi}$$

$$F_c = F_t + W = 114\,102,13\text{ lbf} + 62\,643,28\text{ lbf} = 176\,745,41\text{ lbf}$$

$$f_{cb} = \frac{F_c}{r C_e (l_4 + nt_s)} = \frac{176\,745,41\text{ lbf}}{(33,31\text{ in})(0,891)[(13,415\text{ in}) + (10)(0,085\text{ in})]} = 379,17\text{ psi}$$

- **Esfuerzo compresivo en los pernos de anclaje**

$$S_a = nf_{cb} \quad (170)$$

$$= (10)(379,17\text{ psi}) = 3\,791,68\text{ psi}$$

- **Esfuerzo compresivo sobre el concreto en la parte extrema el anillo base**

$$f_c = \frac{f_{cb}(2kd + l)}{2kd} = \frac{(379,17\text{ psi})[(2)(0,11)(66,625\text{ in}) + 13,5]}{(2)(0,11)(66,625\text{ in})} = 728,4\text{ psi}$$

Ancho requerido del anillo base  $I_1 = 6,375\text{ in}$ .

Se utilizarán dos Gussets para reducir el espesor calculado del anillo base.

$$t_B = I_1 \sqrt{\frac{3f_c}{S}} \quad (171)$$

$$= (6,375 \text{ in}) \sqrt{\frac{3(728,4 \text{ psi})}{(20\,000 \text{ psi})}} = 2,11 \text{ in}$$

Según recomendaciones se utilizarán dos placas paralelas de acero o Gussets por cada perno de anclaje para reducir el espesor calculado, además se calculará la distancia entre dichas placas así como el nuevo espesor del anillo valiéndonos del Anexo 31. Dado que la bota de gas cae en el rango de recipientes altos se instalarán sillas o refuerzos para los pernos de anclaje, la geometría a utilizar se detalla en el Anexo 32.

$$b = \frac{\pi d}{24} \quad (172)$$

$$= \frac{\pi(66,625 \text{ in})}{24} = 8,72 \text{ in}$$

$$\frac{I_1}{b} \quad (173)$$

$$= \frac{6,375 \text{ in}}{8,72 \text{ in}} = 0,731$$

$$M_{\max} = M_y = 0,206f_c I_1^2 \quad (174)$$

$$= 0,206(728,4 \text{ psi})(6,375 \text{ in})^2 = 6\,098,14 \text{ lbin}$$

$$t_B = \sqrt{\frac{I_1 M_{\max}}{S}} \quad (175)$$

$$= \sqrt{\frac{(6,375 \text{ in})(6\,098,14 \text{ lbin})}{(20\,000 \text{ psi})}} = 1,39 \text{ in}$$

Se tomará un espesor de  $t_B = 1,75 \text{ in}$  para la placa base.



Dónde;

$b$  = Distancia descrita por el arco entre Gussets, en in.

$B_t$  = Área total requerida para los pernos de anclaje, en in<sup>2</sup>.

$C_c, C_t$  = Constantes obtenidas en el Anexo 31.

$D$  = Diámetro de los pernos de anclaje, en ft.

$d$  = Diámetro de los pernos de anclaje, en in.

$f_c$  = Esfuerzo compresivo sobre el concreto en el anillo base, en psi.

$f_{cb}$  = Esfuerzo compresivo sobre el concreto aplicado en la circunferencia que describen los pernos de anclaje, en psi.

$j$  = Constante obtenida en el Anexo 31.

$M$  = Momento flector en la base, en lb-in.

$n$  = Razón entre los módulos de elasticidad del acero y el concreto, Anexo 31.

$r$  = Radio de la circunferencia que describen los pernos de anclaje, en in.

$S_a$  = Esfuerzo de tensión admisible en los pernos de anclaje, en psi.

$S$  = Esfuerzo admisible de la placa base, en psi.

$W$  = Peso por encima del punto de análisis, en lbf.

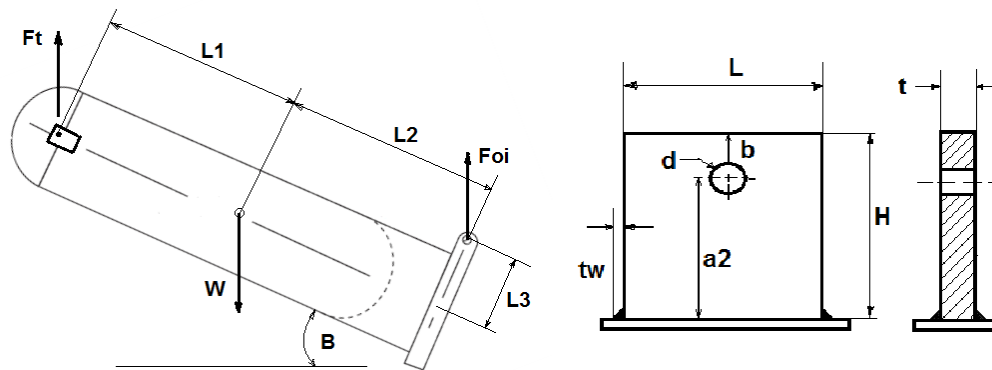
$z$  = Constante obtenida en el Anexo 31.

$t_B$  = Espesor del anillo base, en in.

**3.3.7 Oreja de izaje.** La bota de gas requiere cambiar su posición de horizontal en su construcción; a vertical para su instalación, dando lugar a un izaje de 90° así como una variación de la carga sobre la oreja a medida que la inclinación varía. Debido a que en el código ASME no existe el marco teórico para el cálculo de este tipo de elementos, el siguiente procedimiento se basará en: (ESCOE, 2008).

Inicialmente se tomarán las recomendaciones geométricas del manual para orejas de izaje, después se calcularán las cargas a las que está sujeta, finalmente se verificará si las dimensiones adoptadas son aceptables siempre y cuando los cocientes analizados no superen la unidad. El peso total para el diseño será 1,5 veces el peso del recipiente en la condición nuevo y vacío, con el fin de agregar un margen de seguridad.

Figura 25: Nomenclatura para orejas de izaje



Fuente: El autor

- Material: SA - 516 70
- Ubicación: Anillo base del faldón.
- Distancia de la oreja de izaje a la línea de referencia o Datum: 56,98 in
- Distancia del centro de gravedad a los trunnion:  $L_1 = 165,04$  in
- Distancia de la oreja de izaje al centro de gravedad del recipiente:  $L_2 = 258,94$  in
- Distancia de la oreja de izaje al eje longitudinal del recipiente:  $L_3 = 37,625$  in
- Orientación: longitudinal
- Posición angular:  $180^\circ$
- Factor de carga: 1,5
- Peso del recipiente en su centro de gravedad  $W = 36\,714$  lb
- Esfuerzo admisible a la tensión:  $\sigma_t = 19\,980$  psi
- Esfuerzo admisible al corte:  $\sigma_s = 13\,320$  psi
- Esfuerzo admisible al contacto bajo presión (bearing):  $\sigma_p = 29\,970$  psi
- Esfuerzo admisible a la flexión:  $\sigma_b = 22\,201$  psi
- Esfuerzo admisible de la soldadura al corte:  $\tau_{\text{admisible}} = 13\,320$  psi
- Dimensión del cordón de soldadura:  $t_w = 0,5$  in
- Distancia de la carga al cuerpo del recipiente:  $a_2 = 7$  in
- Excentricidad de la carga:  $a_1 = 0$
- Diámetro del perno que ingresará en la oreja de izaje:  $D_p = 1,375$  in
- Diámetro del agujero en la oreja de izaje:  $d = 1,5$  in
- Espesor de la oreja de izaje:  $t = 1$  in
- Altura de la oreja de izaje:  $H = 10$  in
- Ancho de la oreja de izaje:  $L, b_1 = 12$  in
- Ancho exterior del anillo base:  $d_1, d_2 = 6,375$  in

### 3.3.7.1 Fuerzas en el izaje

Se calcularán las fuerzas  $F_t$  y  $F_{oi}$  en diferentes ángulos, con la finalidad de obtener los valores máximos.  $F_t$  es la reacción por cada Trunnion de los dos existentes.

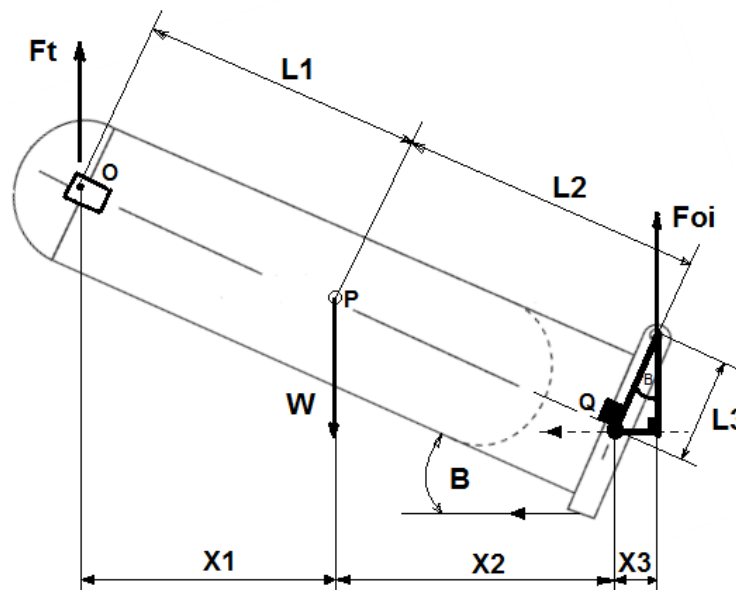
$$F_t = \frac{W(L_2 \cos \alpha + L_3 \sin \alpha)}{2(L_1 \cos \alpha + L_2 \cos \alpha + L_3 \sin \alpha)} \quad (176)$$

$$= \frac{9,50 \times 10^6 (\cos \alpha) + 1,38 \times 10^6 (\sin \alpha)}{330,08 (\cos \alpha) + 517,88 (\cos \alpha) + 75,25 (\sin \alpha)}$$

$$F_{oi} = W - 2F_t \quad (177)$$

$$= 36\,714 \text{ lb} - 2F_t$$

Figura 26: Diagrama de cuerpo libre del izaje



Fuente: El autor

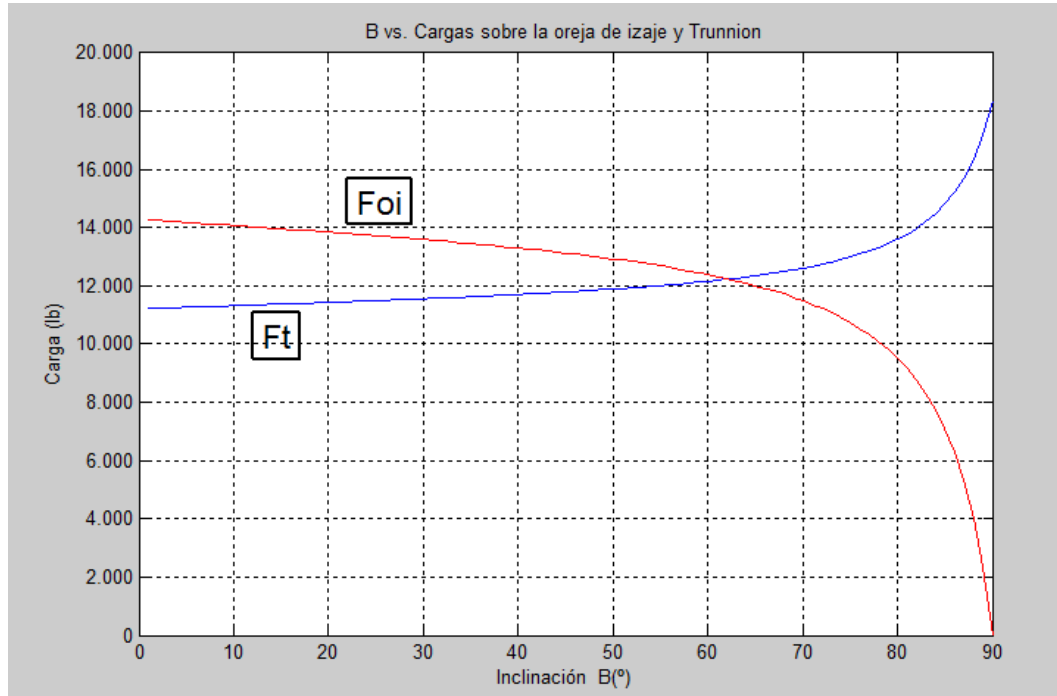
Tabla 17: Cargas significativas en elementos de izaje con respecto a su inclinación

B (°)	F <sub>t</sub> (lb)	F <sub>oi</sub> (lb)
0	11211	14291
15	11377	13959
30	11560	13595
45	11794	13127
60	12163	12387
75	12989	10736
90	18357	0

Fuente: El autor

Evaluando las ecuaciones en Matlab:

Figura 27: Comportamiento de cargas en elementos de izaje con respecto a su inclinación



Fuente: El autor

- **Diámetro del perno – esfuerzo de corte**

Es el perno que se anclará a la oreja de izaje durante su transporte e instalación

$$d_{\text{req}} = \sqrt{\frac{2F_r}{\pi\sigma_s}} \quad (178)$$

$$= \sqrt{\frac{2(14\,291 \text{ lb})}{\pi(13\,320 \text{ psi})}} = 0,83 \text{ in}$$

$$\frac{d_{\text{req}}}{D_p} = \frac{0,83 \text{ in}}{1,375 \text{ in}} = 0,60 \quad (\text{Aceptable})$$

$$\sigma = \frac{F_r}{2(0,25\pi D_p^2)} \quad (179)$$

$$= \frac{14\,291 \text{ lb}}{2[0,25\pi(1,375 \text{ in})^2]} = 4\,812,13 \text{ psi}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_s} = \frac{4\,812,13 \text{ psi}}{13\,320 \text{ psi}} = 0,36 \quad (\text{Acceptable})$$

- **Espesor de oreja de izaje – esfuerzo de tensión**

$$t_{\text{req}} = \frac{F_r}{\sigma_t(L - d)} \quad (180)$$

$$= \frac{14\,291 \text{ lb}}{(19\,980 \text{ psi})(12 \text{ in} - 1,5 \text{ in})} = 0,068 \text{ in}$$

$$\frac{t_{\text{req}}}{t} = \frac{0,069 \text{ in}}{1 \text{ in}} = 0,068 \quad (\text{Acceptable})$$

$$\sigma = \frac{F_r}{t(L - d)} \quad (181)$$

$$= \frac{14\,291 \text{ lb}}{(1 \text{ in})(12 \text{ in} - 1,5 \text{ in})} = 1\,361,05 \text{ psi}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_t} = \frac{1\,361,05 \text{ psi}}{19\,980 \text{ psi}} = 0,068 \quad (\text{Acceptable})$$

- **Espesor de oreja de izaje – esfuerzo debido al contacto (Bearing)**

$$t_{\text{req}} = \frac{F_v}{D_p \sigma_p} \quad (182)$$

$$= \frac{14\,291 \text{ lb}}{(1,375 \text{ in})(29\,970)} = 0,35 \text{ in}$$

$$\frac{t_{\text{req}}}{t} = \frac{0,35 \text{ in}}{1 \text{ in}} = 0,35 \quad (\text{Acceptable})$$

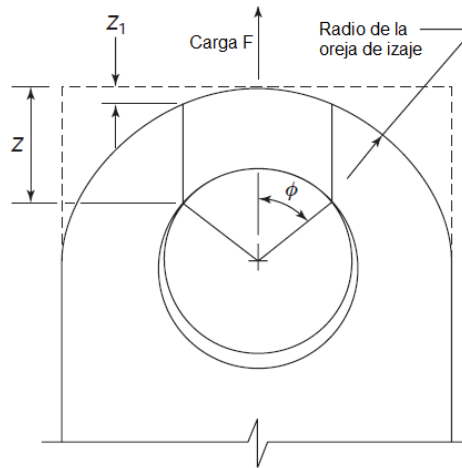
$$\sigma = \frac{F_v}{tD_p} \quad (183)$$

$$= \frac{14\,291 \text{ lb}}{(1,375 \text{ in})(1 \text{ in})} = 10\,393,45 \text{ psi}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_p} = \frac{10\,393,45 \text{ psi}}{29\,970 \text{ psi}} = 0,35 \quad (\text{Acceptable})$$

- **Espesor de oreja de izaje – esfuerzo de corte**

Figura 28: Falla de tipo doble plano y nomenclatura asociada



Fuente: (ESCOE, 2008 pág. 121)

$$\phi = \frac{55D_p}{d} \quad (184)$$

$$= \frac{55(1,375 \text{ in})}{(1,5 \text{ in})} = 50,42^\circ$$

$$L_{\text{corte}} = Z = (H - a_2 - 0,5d) + 0,5D_p(1 - \cos\phi) \quad (185)$$

$$= [10 \text{ in} - 7 \text{ in} - 0,5(1,5 \text{ in})] + 0,5(1,375 \text{ in})[1 - \cos(50,42)] = 2,5 \text{ in}$$

$$t_{\text{req}} = \frac{F_v}{2\sigma_s L_{\text{corte}}} \quad (186)$$

$$= \frac{14\,291 \text{ lb}}{2(13\,320 \text{ psi})(2,5 \text{ in})} = 0,21 \text{ in}$$

$$\frac{t_{\text{req}}}{t} = \frac{0,21 \text{ in}}{1 \text{ in}} = 0,21 \quad (\text{Acceptable})$$

$$\tau = \frac{F_v}{2tL_{\text{corte}}} \quad (187)$$

$$= \frac{14\,291 \text{ lb}}{2(1 \text{ in})(2,5 \text{ in})} = 2\,858,2 \text{ psi}$$

$$\frac{\tau}{\sigma_s} = \frac{2\,858,2 \text{ psi}}{13\,320 \text{ psi}} = 0,21 \quad (\text{Aceptable})$$

**3.3.7.2 Esfuerzo de la placa que conforma la oreja de izaje.** Se calculará el esfuerzo de la placa durante el izaje en el ángulo donde la tensión y compresión por contacto son máximas, en este caso es de  $11^\circ$  por ende  $F_{oi} = 14\,049 \text{ lb}$ . Si el valor resultante del esfuerzo es  $\leq 1$  será considerado aceptable; de lo contrario se iterará hasta encontrar el ángulo que permita cumplir la condición.

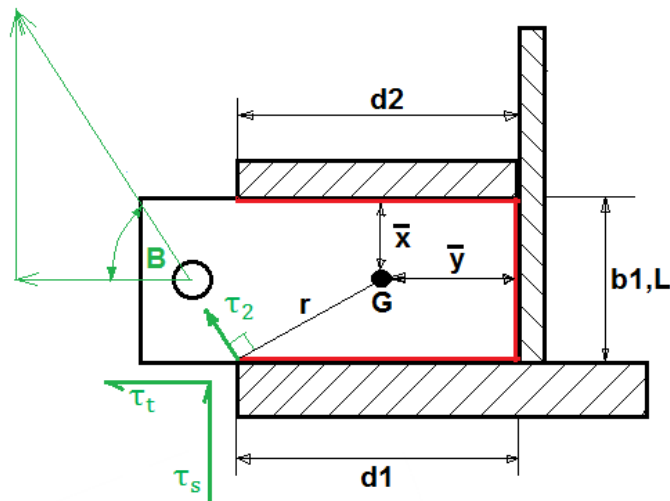
$$\sigma_{\text{razón}} = \frac{F_{oi(B)} \cos B}{tL\sigma_t} + \frac{6|0,625F_{oi(B)} \sin B - a_1 F_{oi(B)} \cos B|}{tL^2\sigma_b} \quad (188)$$

$$= \frac{(14\,049 \text{ lb})[\cos(11)]}{(1)(12)(19\,980 \text{ psi})} + \frac{6|0,625(14\,049 \text{ lb})[\sin(11)] - (0)(14\,049 \text{ lb})[\cos(11)]|}{(1 \text{ in})(12 \text{ in})^2(22\,201 \text{ psi})}$$

$$= 0,06 \quad (\text{Aceptable})$$

- *Esfuerzo en soldadura*

Figura 29: Esfuerzos en soldadura y nomenclatura asociada



Fuente: El autor

Se determinará si la soldadura utilizada para acoplar la oreja de izaje al recipiente es capaz de resistir los esfuerzos de tensión, flexión y corte, producto de las cargas a las que estará sujeta durante su izaje en el ángulo más crítico. Inicialmente se analizarán las tres soldaduras correspondientes a una cara del elemento como se muestra en la Fig. 28, para después por medio del teorema del eje paralelo calcular el momento polar de inercia total de las 6 soldaduras.

Se calcularán los esfuerzos de corte directo, torsional y secundario; si este último resulta  $\leq 1$  la soldadura será considerada aceptable; de lo contrario se iterará hasta encontrar el ángulo que permita cumplir la condición.

- **Corte directo.**

El ángulo crítico es de  $58^\circ$ , por lo que:  $F_{oi} = 12\,514\text{ lb}$

$$A_{\text{sold}} = 2(0,707)t_w(d_1 + b_1 + d_2 + t) \quad (189)$$

$$= 2(0,707)(0,5\text{ in})(6,375\text{ in} + 12\text{ in} + 6,375\text{ in} + 1\text{ in}) = 18,20\text{ in}^2$$

$$\tau_t = \frac{F_{oi} \cos B}{A_{\text{sold}}} \quad (190)$$

$$= \frac{(12\,514\text{ lb})[\cos(58)]}{18,20\text{ in}^2} = 364,36\text{ psi}$$

$$\tau_s = \frac{F_{oi} \sin B}{A_{\text{sold}}} \quad (191)$$

$$= \frac{(12\,514\text{ lb})[\sin(58)]}{18,20\text{ in}^2} = 583,1\text{ psi}$$

- **Corte torsional**

- *Áreas de soldadura*

Se determinará el área de las tres soldaduras presentes.

$$A_i = 0,707t_wL_i \quad (192)$$



$$A_1 = 0,707t_w L_1 = 0,707(0,5 \text{ in})(6,375 \text{ in}) = 2,25 \text{ in}^2$$

$$A_2 = 0,707t_w L_2 = 0,707(0,5 \text{ in})(12 \text{ in}) = 4,24 \text{ in}^2$$

$$A_3 = 0,707t_w L_3 = 0,707(0,5 \text{ in})(6,375 \text{ in}) = 2,25 \text{ in}^2$$

$$A_{\text{sold torsión}} = \sum A_i \quad (193)$$

$$= A_1 + A_2 + A_3 = 2,25 \text{ in}^2 + 4,24 \text{ in}^2 + 2,25 \text{ in}^2 = 8,75 \text{ in}^2$$

- *Ubicación del centroide de las soldaduras*

$$x_1 = 0 \text{ in}; y_1 = 3,19 \text{ in}$$

$$x_2 = 6 \text{ in}; y_2 = 0 \text{ in}$$

$$x_3 = 12 \text{ in}; y_3 = 3,19 \text{ in}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum A_i x_i}{\sum A_i} \quad (194)$$

$$= \frac{(2,25 \text{ in}^2)(0 \text{ in}) + (4,24 \text{ in}^2)(6 \text{ in}) + (2,25 \text{ in}^2)(12 \text{ in})}{8,75 \text{ in}^2} = 6 \text{ in}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i} \quad (195)$$

$$= \frac{(2,25 \text{ in}^2)(3,19 \text{ in}) + (4,24 \text{ in}^2)(0 \text{ in}) + (2,25 \text{ in}^2)(3,19 \text{ in})}{8,75 \text{ in}^2} = 1,64 \text{ in}$$

- *Radio de giro al centroide*

$$r_i = \sqrt{(\bar{x} - x_i)^2 + (\bar{y} - y_i)^2} \quad (196)$$

$$r_1 = \sqrt{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{y} - y_1)^2} = \sqrt{(6 - 0)^2 + (1,64 - 3,19)^2} = 6,2 \text{ in}$$

$$r_2 = \sqrt{(\bar{x} - x_2)^2 + (\bar{y} - y_2)^2} = \sqrt{(6 - 6)^2 + (1,64 - 0)^2} = 1,64 \text{ in}$$

$$r_3 = \sqrt{(\bar{x} - x_3)^2 + (\bar{y} - y_3)^2} = \sqrt{(6 - 12)^2 + (1,64 - 3,19)^2} = 6,2 \text{ in}$$

- *Distancia radial del centroide a la soldadura*

$$r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (197)$$

$$= \sqrt{(12 - 6)^2 + (6,375 - 1,64)^2} = 7,64 \text{ in}$$

$$\theta_r = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (198)$$

$$= \arctan\left(\frac{4,733 \text{ in}}{6 \text{ in}}\right) = 38,27^\circ$$

- *Momento polar de área*

$$J_i = \frac{0,707 t_w L_i^3}{12} \quad (199)$$

$$J_1 = \frac{0,707 t_w L_1^3}{12} = \frac{0,707(0,5 \text{ in})(6,375 \text{ in})^3}{12} = 7,63 \text{ in}^4$$

$$J_2 = \frac{0,707 t_w L_2^3}{12} = \frac{0,707(0,5 \text{ in})(12 \text{ in})^3}{12} = 50,9 \text{ in}^4$$

$$J_3 = \frac{0,707 t_w L_3^3}{12} = \frac{0,707(0,5 \text{ in})(6,375 \text{ in})^3}{12} = 7,63 \text{ in}^4$$

- *Teorema del eje paralelo.* Se aplica debido a la simetría en las soldaduras en la otra cara de la oreja de izaje.

$$J = 2 \sum (J_i + A_i r_i^2) \quad (200)$$

$$= 2\{[7,63 + (2,25)(6,2)^2] + [50,9 + (4,24)(1,64)^2] + [7,63 + (2,25)(6,2)^2]\}$$

$$= 501,26 \text{ in}^4$$

- **Corte secundario**

$$\tau_2 = \frac{r[F_{oi}\cos B(x - \bar{x}) - F_{oi}\sin B(y - \bar{y})]}{J} \quad (201)$$

$$= \frac{(7,64)[(12\,514\text{ lb})\cos(58)(6 - 6) - (12\,514\text{ lb})\sin(58)(7 - 1,64)]}{501,26\text{ in}^4} = -866,98\text{ psi}$$

$$\tau_{\text{razón}} = \frac{\sqrt{(\tau_t - \tau_2\cos\theta_r)^2 + (\tau_s - \tau_2\sin\theta_r)^2}}{\tau_{\text{admisible}}} \quad (202)$$

$$= \frac{\sqrt{[364,36\text{ psi} - (866,98\text{ psi})\cos(38,27)]^2 + [583,1\text{ psi} - (866,98\text{ psi})\sin(38,27)]^2}}{13\,320\text{ psi}}$$

$$= 0,024 \quad (\text{Aceptable})$$

Dónde;

W = Peso del recipiente en su centro de gravedad, en lb.

B = Ángulo de inclinación del recipiente, en grados sexagesimales.

F<sub>t</sub> = Reacción sobre cada trunnion, en lb.

F<sub>oi</sub> = Reacción sobre la oreja de izaje, en lb.

F<sub>r</sub>, F<sub>v</sub> = Reacción sobre la oreja de izaje a 0°, en lb.

σ<sub>t</sub> = Esfuerzo admisible a la tensión, en psi.

σ<sub>s</sub> = Esfuerzo admisible al corte, en psi.

σ<sub>p</sub> = Esfuerzo admisible al contacto bajo presión (bearing), en psi.

σ<sub>b</sub> = Esfuerzo admisible a la flexión, en psi.

τ<sub>admisible</sub> = Esfuerzo admisible de la soldadura al corte, en psi.

φ = Ángulo de la carga con respecto a la vertical, en grados sexagesimales.

t<sub>w</sub> = Espesor del cordón de soldadura, en in.

a<sub>2</sub> = Distancia de la carga al cuerpo del recipiente, en in.

a<sub>1</sub> = Excentricidad de la carga, en in.

D<sub>p</sub> = Diámetro del perno que ingresará en la oreja de izaje, en in.

d = Diámetro del agujero en la oreja de izaje, en in.

t = Espesor de la oreja de izaje, en in.

H = Altura de la oreja de izaje, en in.

L = Ancho de la oreja de izaje, en in.

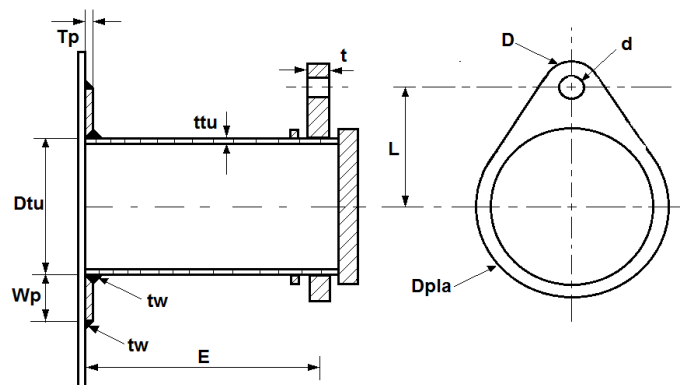
A<sub>sold</sub> = Área de soldadura, en in<sup>2</sup>.

A<sub>i</sub> = Área del cordón de soldadura analizado, en in<sup>2</sup>.

L<sub>i</sub> = Altura del cordón analizado, en in.

**3.3.8 Trunnion,** Dado que éste elemento es complementario a la oreja de izaje en su funcionalidad y diseño guarda muchas similitudes, no así como su número, ubicación y geometría. Debido a que en el código ASME no existe el marco teórico para el cálculo de este tipo de elementos, el procedimiento de cálculo se basará en: (ESCOE, 2008). Inicialmente se tomarán las recomendaciones geométricas del manual para Trunnions, después se verificará si las dimensiones adoptadas son aceptables siempre y cuando los cocientes analizados no superen la unidad.

Figura 30: Nomenclatura asociada a trunnion



Fuente: El autor

- Material: SA - 516 70
- Ubicación: Cilindro #1
- Distancia del Trunnion a la línea de referencia o Datum: 367 in
- Distancia del centro de gravedad a los trunnion:  $L_1 = 165,04$  in
- Distancia de la oreja de izaje al centro de gravedad del recipiente:  $L_2 = 258,94$  in
- Distancia de la oreja de izaje al eje longitudinal del recipiente:  $L_3 = 37,625$  in
- Posición angular:  $90^\circ$  y  $270^\circ$
- Factor de carga: 1,5
- Peso del recipiente en su centro de gravedad  $W = 36\,714$  lb
- Esfuerzo admisible a la tensión:  $\sigma_t = 19\,980$  psi
- Esfuerzo admisible al corte:  $\sigma_s = 13\,320$  psi
- Esfuerzo admisible al contacto bajo presión (bearing):  $\sigma_p = 29\,970$  psi
- Esfuerzo admisible a la flexión:  $\sigma_b = 22\,201$  psi
- Esfuerzo admisible de la soldadura al corte:  $\tau_{\text{admisible}} = 13\,320$  psi
- Dimensión del cordón de soldadura:  $t_w = 0,5$  in
- Distancia entre los ejes del tubo y agujero de la oreja de izaje:  $L = 10$  in
- Espesor de oreja:  $t = 1$  in

- Diámetro de agujero en oreja:  $d = 1,75$  in
- Diámetro del perno:  $D_p = 1,5$  in
- Diámetro exterior de la oreja en la parte del agujero:  $D = 5,5$  in
- Excentricidad de la carga:  $E = 8$  in
- Espesor del surco que alojará el cordón de soldadura:  $t_{\text{surco}} = 0,5$  in
- Ancho del Pad de refuerzo:  $W_p = 4$  in
- Espesor de la placa refuerzo:  $T_p = 0,5$  in
- Espesor del cordón de soldadura en la placa de refuerzo:  $t_{wp} = 0,5$  in
- Espesor del tubo:  $D_{tu} = 10,75$  in
- Espesor mínimo de tubo:  $t_p = 0,4375$  in
- Diámetro externo de la oreja en la parte acoplada al tubo:  $D_{pla} = 15$  in
- Diámetro interno del tubo bajo el espesor mínimo:  $ID_{tu} = 9,875$  in

- **Fuerzas en el izaje**

Debido a que el Trunnion es complementario a la oreja de izaje de la base, se utilizarán los valores determinados en la Tabla 16 y figura 26. Teniendo en cuenta que el valor más crítico es de 18 357 lb.

### 3.3.8.1 Oreja de izaje

$$d_{\text{req}} = \sqrt{\frac{2F_r}{\pi\sigma_s}} = \sqrt{\frac{2(18\,357\text{ lb})}{\pi(13\,320\text{ psi})}} = 0,937\text{ in}$$

$$\frac{d_{\text{req}}}{D_p} = \frac{0,937\text{ in}}{1,5\text{ in}} = 0,62 \quad (\text{Aceptable})$$

$$\sigma = \frac{F_r}{2(0,25\pi D_p^2)} = \frac{18\,357\text{ lb}}{0,5\pi(1,5)^2} = 5\,194\text{ psi}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_s} = \frac{5\,194\text{ psi}}{13\,320\text{ psi}} = 0,39 \quad (\text{Aceptable})$$

- **Espesor de oreja – esfuerzo de tensión**

$$t_{\text{req}} = \frac{F_r}{\sigma_t(D - d)} \quad (203)$$

$$= \frac{18\,357 \text{ lb}}{(19\,980 \text{ psi})(5,5 \text{ in} - 1,75 \text{ in})} = 0,245 \text{ in}$$

$$\frac{t_{\text{req}}}{t} = \frac{0,245 \text{ in}}{1} = 0,24 \quad (\text{Acceptable})$$

$$\sigma = \frac{F_r}{t(D - d)} \quad (204)$$

$$= \frac{18\,357 \text{ lb}}{(1 \text{ in})(5,5 \text{ in} - 1,75 \text{ in})} = 4\,895 \text{ psi}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_t} = \frac{4\,895 \text{ psi}}{19\,980 \text{ psi}} = 0,25 \quad (\text{Acceptable})$$

- **Diámetro exterior requerido de la placa ligamento de oreja – esfuerzo debido a tensión**

$$\sigma_{\text{ten}} = \frac{F_v}{t(D_{\text{pla}} - D_{\text{tu}})} \quad (205)$$

$$= \frac{18\,357 \text{ lb}}{(1 \text{ in})(15 \text{ in} - 10,75 \text{ in})} = 4\,319 \text{ psi}$$

$$\frac{\sigma_{\text{ten}}}{\sigma_t} = \frac{4\,319 \text{ psi}}{19\,980 \text{ psi}} = 0,22 \quad (\text{Acceptable})$$

$$DE_{\text{req}} = \frac{F_v}{t\sigma_t} + D_{\text{tu}} \quad (206)$$

$$= \frac{18\,357 \text{ lb}}{(1 \text{ in})(19\,980 \text{ psi})} + 10,75 \text{ in} = 11,67 \text{ in}$$

$$\frac{DE_{\text{req}}}{D_{\text{pla}}} = \frac{11,67 \text{ in}}{15 \text{ in}} = 0,78 \quad (\text{Acceptable})$$

- **Espesor de oreja – esfuerzo debido al contacto (Bearing)**

$$t_{\text{req}} = \frac{F_v}{D_p \sigma_p} = \frac{18\,357 \text{ lb}}{(1,5 \text{ in})(29\,970 \text{ psi})} = 0,408 \text{ in}$$

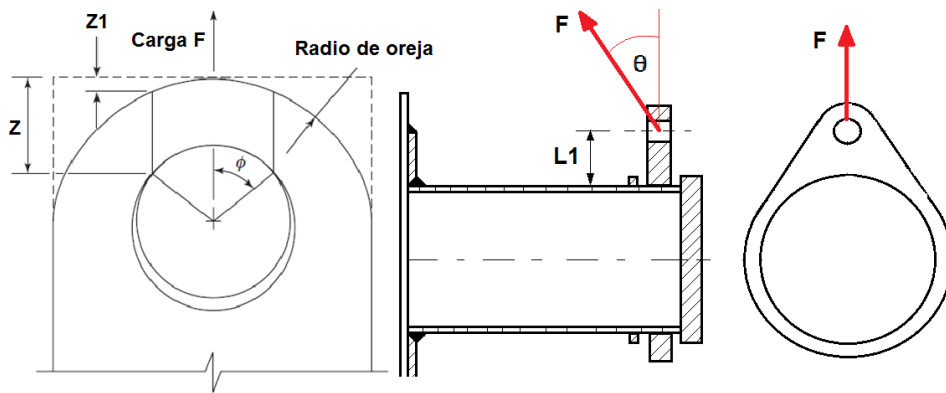
$$\frac{t_{req}}{t} = \frac{0,408 \text{ in}}{1 \text{ in}} = 0,41 \quad (\text{Aceptable})$$

$$\sigma = \frac{F_v}{tD_p} = \frac{18\,357 \text{ lb}}{(1,5 \text{ in})(1 \text{ in})} = 12\,238 \text{ psi}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_p} = \frac{12\,238 \text{ psi}}{29\,970 \text{ psi}} = 0,41 \quad (\text{Aceptable})$$

- **Espesor de oreja – esfuerzo de corte**

Figura 31: Fallas en trunnion y nomenclatura asociada



Fuente: El autor

$$\phi = \frac{55D_p}{d} = \frac{55(1,5 \text{ in})}{(1,75 \text{ in})} = 47,14^\circ$$

$$Z = 0,5(D - d) + 0,5D_p(1 - \cos\phi) \quad (207)$$

$$= 0,5(5,5 \text{ in} - 1,75 \text{ in}) + 0,5(1,5 \text{ in})(1 - \cos 47,14) = 2,11 \text{ in}$$

$$Z_1 = 0,5D - \sqrt{0,25D^2 - [0,5D_p(\sin\phi)]^2} \quad (208)$$

$$= 0,5(5,5 \text{ in}) - \sqrt{0,25(5,5 \text{ in})^2 - [0,5(1,5 \text{ in})(\sin 47,14)]^2} = 0,05 \text{ in}$$

$$L_{\text{corte}} = Z - Z_1 \quad (209)$$

$$= 2,11 \text{ in} - 0,05 \text{ in} = 2,06 \text{ in}$$

$$t_{\text{req}} = \frac{F_v}{2\sigma_s L_{\text{corte}}} = \frac{18\,357 \text{ lb}}{2(2,06 \text{ in})(13\,320 \text{ psi})} = 0,33 \text{ in}$$

$$\frac{t_{\text{req}}}{t} = \frac{0,33 \text{ in}}{1 \text{ in}} = 0,33 \quad (\text{Acceptable})$$

$$\tau = \frac{F_v}{2tL_{\text{corte}}} = \frac{18\,357 \text{ lb}}{2(1 \text{ in})(2,06 \text{ in})} = 4\,457 \text{ psi}$$

$$\frac{\tau}{\sigma_s} = \frac{4\,457 \text{ psi}}{13\,320 \text{ psi}} = 0,33 \quad (\text{Acceptable})$$

- **Ángulo máximo de izaje**

Se determinará el ángulo máximo entre el cable de izaje y la vertical, el cual garantice que la oreja del Trunnion no falle por flexión, sabiendo que al estar el recipiente vertical el peso total será soportado por los dos Trunnions. Para ello se propone el siguiente procedimiento:

$$Z_s = \frac{bh^2}{6} \quad (210)$$

$$M = L_1 F_t \sin \theta \quad (211)$$

$$F_t \cos \theta = 0,5W \quad (212)$$

$$\sigma_b = \frac{M}{Z_s} \quad (213)$$

Reemplazando;

$$\theta = \arctan\left(\frac{2\sigma_b bh^2}{6WL_1}\right) \quad (214)$$

$$= \arctan\left(\frac{2(22\,201 \text{ psi})(7,93 \text{ in})(1 \text{ in})^2}{6(36\,714 \text{ lb})(4,625 \text{ in})}\right) = 19,06^\circ$$

- **Esfuerzos en soldadura**



Se verificará si las soldaduras que acoplan el Trunnion al recipiente presenten la resistencia adecuada ante los esfuerzos de: flexión, corte directo y torsional; mientras se realiza el izaje. Cabe destacar que el corte torsional del Trunnion con respecto al cuerpo es igual a cero, ya que la oreja rota libremente ante la inclinación.

- *Corte directo.* Se analizará bajo la inclinación más crítica (90°).

$$A_{\text{sold}} = (0,707t_w + t_{\text{surco}})(\pi D_{\text{tu}}) \quad (215)$$

$$= \pi(10,75 \text{ in})[0,707(0,5 \text{ in}) + 0,5 \text{ in}] = 28,82 \text{ in}^2$$

$$\tau_1 = \frac{F_t}{A_{\text{sold}}} \quad (216)$$

$$= \frac{18\,357 \text{ lb}}{28,82 \text{ in}^2} = 637 \text{ psi}$$

- *Corte torsional.*

Segundo momento polar de inercia

$$J = (0,707t_w + t_{\text{surco}})(0,25\pi D_{\text{tu}}^3) \quad (217)$$

$$= 0,25\pi(10,75 \text{ in})^3[0,707(0,5) + 0,5] = 832,76 \text{ in}^4$$

$$\tau_2 = \frac{F_t(\cos B)rL}{J} \quad (218)$$

$$= \frac{(18\,357 \text{ lb})(\cos 90)(10 \text{ in})(5,375 \text{ in})}{832,76 \text{ in}^4} = 0 \text{ psi}$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (219)$$

$$= 637 \text{ psi} + 0 = 637 \text{ psi}$$

- *Esfuerzo flector, módulo de sección*

$$Z_{\text{sold}} = (0,707t_w + t_{\text{surco}}) \left( \frac{\pi D_{\text{tu}}^3}{4D_{\text{tu}}} \right) \quad (220)$$

$$= [0,707(0,5) + 0,5] \left[ \frac{\pi(10,75 \text{ in})^3}{4(10,75 \text{ in})} \right] = 77,47 \text{ in}^3$$

$$\sigma_{\text{sold}} = \frac{F_t E}{Z_{\text{sold}}} \quad (221)$$

$$= \frac{(18\,357 \text{ lb})(7,5 \text{ in})}{77,47 \text{ in}^3} = 1\,777 \text{ psi}$$

$$\tau_{\text{total}} = \sqrt{\tau^2 + \sigma_{\text{sold}}^2} \quad (222)$$

$$= \sqrt{(637 \text{ psi})^2 + (1\,777 \text{ psi})^2} = 1\,888 \text{ psi}$$

$$\frac{\tau_{\text{total}}}{\tau_{\text{adm}}} = \frac{1\,888 \text{ psi}}{13\,320 \text{ psi}} = 0,14 \quad (\text{Acceptable})$$

### 3.3.8.2 Pad de refuerzo

- Esfuerzos en soldadura de refuerzo**

Se verificará si las soldaduras en el pad de refuerzo del Trunnion presenten la resistencia adecuada ante los esfuerzos de: flexión, corte directo y torsional; mientras se realiza el izaje.

- *Corte directo.* Se analizará bajo la inclinación más crítica (90°).

$$A_{\text{sold}} = 0,707t_{\text{wp}}(\pi D_{\text{pad}}) \quad (223)$$

$$= 0,707\pi(0,5 \text{ in})(18,75 \text{ in}) = 20,82 \text{ in}^2$$

$$\tau_1 = \frac{F_t}{A_{\text{sold}}} = \frac{18\,357 \text{ lb}}{20,82 \text{ in}^2} = 882 \text{ psi}$$

- *Corte torsional.*

- **Segundo momento polar de inercia**

$$J = 0,707t_{wp}(0,25\pi D_{pad}^3) \quad (224)$$

$$= 0,707\pi(0,5 \text{ in})(0,25)(18,75 \text{ in})^3 = 1\,830,13 \text{ in}^4$$

$$\tau_2 = \frac{F_t(\cos B)Lr}{J} = \frac{(18\,357 \text{ lb})(\cos 90)(10 \text{ in})(9,375 \text{ in})}{1\,830,13 \text{ in}^4} = 0 \text{ psi}$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 882 \text{ psi} + 0 = 882 \text{ psi}$$

- *Esfuerzo flector*

- **Módulo de sección**

$$Z_{sold} = 0,707t_{wp} \left( \frac{\pi D_{pad}^3}{4D_{pad}} \right) \quad (225)$$

$$= 0,707(0,5 \text{ in}) \left[ \frac{\pi(18,75 \text{ in})^3}{4(18,75 \text{ in})} \right] = 97,61 \text{ in}^3$$

$$\sigma_{sold} = \frac{F_t E}{Z_{sold}} = \frac{(18\,357 \text{ lb})(8 \text{ in})}{97,61 \text{ in}^3} = 1\,505 \text{ psi}$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\tau^2 + \sigma_{sold}^2} = \sqrt{(882 \text{ psi})^2 + (1\,505 \text{ psi})^2} = 1\,744 \text{ psi}$$

$$\frac{\tau_{total}}{\tau_{adm}} = \frac{1\,744 \text{ psi}}{13\,320 \text{ psi}} = 0,13 \quad (\text{Acceptable})$$

### 3.3.8.3 *Tubo*

- **Esfuerzos de flexión sobre el trunnion**

$$\sigma_{trun} = \frac{32F_t E D_{tu}}{\pi(D_{tu}^4 - ID_{tu}^4)} \quad (226)$$

$$= \frac{32(18\,357 \text{ lb})(7,5 \text{ in})(10,75 \text{ in})}{\pi((10,75 \text{ in})^4 - (9,875 \text{ in})^4)} = 3\,920 \text{ psi}$$

$$\frac{\sigma_{\text{trun}}}{\sigma_b} = \frac{3\,920 \text{ psi}}{22\,201 \text{ psi}} = 0,18 \quad (\text{Acceptable})$$

- **Espesor requerido de tubo**

$$t_{\text{reqf}} = 0,5 \left( D_{\text{tu}} - \sqrt[4]{D_{\text{tu}}^4 - \frac{32F_t E D_p}{\pi \sigma_b}} \right) \quad (227)$$

$$= 0,5 \left( 10,75 \text{ in} - \sqrt[4]{(10,75 \text{ in})^4 - \frac{32(18\,357 \text{ lb})(7,5 \text{ in})(1,5 \text{ in})}{\pi(22\,201 \text{ psi})}} \right) = 0,07 \text{ in}$$

$$\frac{t_{\text{reqf}}}{\sigma_b} = \frac{0,07 \text{ in}}{0,4375 \text{ in}} = 0,16 \quad (\text{Acceptable})$$

- **Esfuerzos de corte sobre el trunnion**

$$\tau_{\text{trun}} = \frac{4F_t}{\pi(D_{\text{tu}}^2 - ID_{\text{tu}}^2)} \quad (228)$$

$$\frac{\tau_{\text{trun}}}{\sigma_s} = \frac{1\,295 \text{ psi}}{13\,320 \text{ psi}} = 0,10 \quad (\text{Acceptable})$$

Dónde;

L = Distancia entre los ejes del tubo y agujero de la oreja de izaje, en in.

t = Espesor de oreja, en in.

d = Diámetro de agujero en oreja, en in.

D<sub>p</sub> = Diámetro del perno, en in.

D = Diámetro exterior de la oreja en la parte del agujero, en in.

E = Excentricidad de la carga, en in.

t<sub>w</sub> = Espesor del cordón de soldadura, en in.

t<sub>surco</sub> = Espesor del surco que alojará el cordón de soldadura, en in.

W<sub>p</sub> = Espesor de la placa refuerzo, en in.

T<sub>p</sub> = Espesor de la placa refuerzo, en in.

t<sub>wp</sub> = Espesor del cordón de soldadura en la placa de refuerzo, en in.

D<sub>tu</sub> = Espesor del tubo, en in.

t<sub>p</sub> = Espesor mínimo de tubo, en in.

$D_{pla}$  = Diámetro externo de la oreja en la parte acoplada al tubo, en in.

$ID_{tu}$  = Diámetro interior bajo el espesor mínimo, en in.

**3.3.9 Eliminador de niebla.** En el mercado existen una gran variedad de eliminadores de niebla, los cuales son seleccionados bajo criterios de: configuración, eficiencia, disponibilidad, costo, propiedades del fluido, etc. Comúnmente los proveedores de este dispositivo proporcionan el marco teórico para validar la selección. A continuación se presenta el procedimiento de cálculo propuesto por el modelo 4CA. (ACS, 2004)

- Tipo de eliminador: ACS 4CA
- Material: Acero inoxidable 304 SS
- Ubicación: Cilindro #2
- Distancia a la línea de referencia o Datum: 362 in
- Datos de Tabla 2 y Anexo 39
- Velocidad y caudal del gas:  $U_T = 7,79 \text{ ft/s}$ ;  $Q_V = 19,38 \text{ ft}^3/\text{s}$
- Peso vacío y en operación: 2 969 kg; 4 453 kg

$$A_E = \frac{Q_V}{U_T} \quad (229)$$

$$= \frac{19,38 \text{ ft}^3/\text{s}}{7,79 \text{ ft/s}} = 2,49 \text{ ft}^2$$

$$k = \frac{(\rho_L - \rho_V)U_T d^2}{9\mu D} \quad (230)$$

$$= \frac{(12)(54,62 - 0,11)(7,79 \text{ ft/s})(1,64 \times 10^{-5} \text{ ft})^2}{9(8 \times 10^{-6} \text{ ft})(0,011 \text{ ft})} = 1,73$$

Del Anexo 11 obtenemos:  $E = 0,5$

$$SO = \frac{0,67At}{\pi} \quad (231)$$

$$= \frac{0,67(85 \text{ ft}^2/\text{ft}^3)(0,5 \text{ ft})}{\pi} = 9,06$$

$$Ef = 100 - \frac{100}{e^{ESO}} \quad (232)$$

$$= 100 - \frac{100}{e^{(0,5)(9,06)}} = 98,92 \%$$

Dónde;

$U_T$  = Velocidad ideal del gas, en ft/s.

$d$  = Diámetro de gota, en ft.

$\mu$  = Viscosidad del gas, en lb/ft s.

$D$  = Diámetro del alambre del eliminador de niebla, en ft.

$Q_V$  = Caudal de gas, en ft<sup>3</sup>/s.

$E$  = Eficiencia de impactación, obtenida en el Anexo 11.

### 3.4 Resultados obtenidos tras el diseño

#### 3.4.1 Presiones

- El MDMT de diseño requerido para hidrocarburos es de -20 °F.
- El MDMT más alto y por ende del recipiente es de -35 °F.
- El MAWP más bajo y por ende del recipiente es de 173,93 psi a 250 °F.
- El MAP en condición “Fría y Nuevo” es de 233,38 psi a 70 °F.
- El MAEP es de 15 psi a 150 °F

Tabla 18: Resumen de presiones

Elemento	P Dis (psi)	T Dis (°F)	MAWP (psi)	MAP (psi)	MDMT (°F)	MAEP (psi)	Te Dis (°F)
Cabeza #1	100	250	237,64	317,68	-55	78,69	150
Cilindro transición cabeza #1 - cuerpo	100	250	247,22	330,03	-41	20,67	150
Cilindro #1	100	250	247,22	330,03	-41	20,67	150
Cilindro #2	100	250	244,51	330,03	-39	20,67	150
Cilindro #3	100	250	241,08	330,03	-38	20,67	150
Cilindro #4	100	250	237,65	330,03	-36	20,67	150
Cilindro #5	100	250	234,22	330,03	-35	20,67	150
Cilindro transición cuerpo - cabeza #2	100	250	207,38	330,03	-35	20,67	150
Cabeza #2	100	250	237,43	334,60	-51	83,62	150
Anillo de refuerzo	...	...	...	...	...	15	...
B1	100	250	231,10	285	-35	20,67	150
B2	100	250	251,39	285	-40	20,67	150
B3	100	250	206,60	285	-35	20,67	150
B4	100	250	206,60	285	-55	20,67	150
B5	100	250	173,93	233,38	-51	20,67	150

Fuente: El autor

### 3.4.2 Espesores

Tabla 19: Resumen de espesores

Elemento	Material	DI (in)	L (in)	t Nom (in)	t Dis (in)	Corr (in)	Junta E	Carga
Cabeza #1	SA-516 70	60	16,8	0,45	0,28	0,25	1	Interna
Cilindro transición cabeza #1 - cuerpo	SA-516 70	60	1,5	0,5	0,455	0,25	1	Externa
Cilindro #1	SA-516 70	60	5,32	0,5	0,455	0,25	1	Externa
Cilindro #2	SA-516 70	60	95	0,5	0,455	0,25	1	Externa
Cilindro #3	SA-516 70	60	95	0,5	0,455	0,25	1	Externa
Cilindro #4	SA-516 70	60	95	0,5	0,455	0,25	1	Externa
Cilindro #5	SA-516 70	60	95	0,5	0,455	0,25	1	Externa
Cilindro transición cuerpo - cabeza #1	SA-516 70	60	1,33	0,5	0,455	0,25	1	Externa
Cabeza #2	SA-516 70	60	17,3	0,45	0,29	0,25	1	Interna
Faldón	SA-516 70	60	60	0,62	0,329	0,25	0.55	Sísmica

Fuente: El autor

### 3.4.3 Pesos

Tabla 20: Resumen de pesos

Elemento	Peso en (lb)							
	Metal Nue	Metal Corr	Líquido operación		Bocas		Tru	Anillo y OI
			Nue	Corr	Nue	Corr		
Cabeza #1	544,5	396,8	0	0	113	109	0	0
Cilindro #1	143,08	107,3	542,25	542,25	0	0	0	0
Cilindro #2	2 555	1 920,2	7 654,7	7 718,6	113	109	6 545	281
Cilindro #3	2 555	1 920,2	9 695,9	9 776,9	0	0	0	0
Cilindro #4	2 555	1 920,2	9 695,9	9 776,9	0	0	0	75,3
Cilindro #5	2 478,1	1 862,5	9 849,2	9 933,8	959	920	0	0
Cabeza #2	554,6	404	1 202	1 221,3	12,4	11,5	0	0
Faldón	2 021,2	1 620,3	0	0	0	0	0	0
Base Faldón	2 066	2 066	0	0	0	0	0	0
Total	15 472,5	12 217,5	39 640	38 970	1 197	1 150	6 545	390,3

Fuente: El autor

### Pesos finales

- Peso del recipiente operando y corroído: 58 573,36 lb
- Peso del recipiente operando y nuevo: 61 776 lb
- Peso del recipiente vacío y corroído: 20 258,5 lb
- Peso del recipiente vacío y nuevo: 24 476 lb

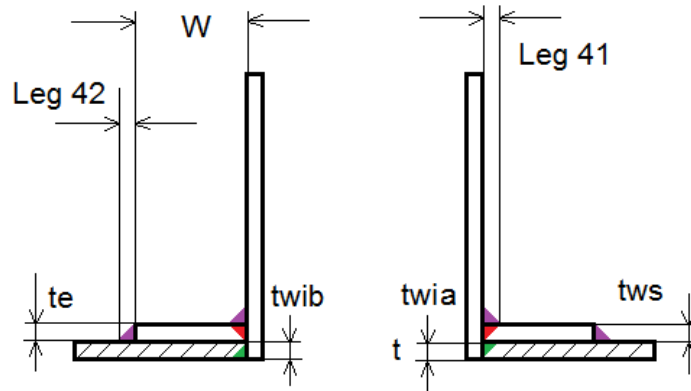
### Capacidades del recipiente

- Capacidad bruta (nuevo): 5 000 gls
- Capacidad bruta (corroído): 4 952 gls

- Capacidad máxima de operación (nuevo): 3 761,6 gls

#### 3.4.4 Bocas

Figura 32: Cordones de suelda en bocas



Fuente: El autor

Tabla 21: Cordones de suelda en bocas

Boca	Dimensiones en in										Áreas
	L 41 (req)	L 42 (req)	Tws (req)	Leg 41	Leg 42	W	te	twia	twib	tws	
B5	0,25	0,25	0,35	0,5	0,5	3,75	0,5	0	0,5	0,5	Acept
B1	0,25	0,25	0,35	0,5	0,5	3	0,5	0,5	0	0,5	Acept
B2	0,25	0,25	0,35	0,5	0,5	3	0,5	0,5	0	0,5	Acept
B3	0,25	0,25	0,35	0,5	0,5	3	0,5	0	0,45	0,5	Acept
B4	0,25	0,25	0,35	0,5	0,5	2	0,5	0	0,45	0,5	Acept

Fuente: El autor

Tabla 22: Características de bocas

Boca	Dimensión	Materiales		
		Boca	Refuerzo	Brida
B5	NPS 24 Sch 160	SA-106 B Smls pipe	SA-516 70	WN A105 Clase 105
B1	NPS 12 Sch 60	SA-106 B Smls pipe	SA-516 70	WN A105 Clase 150
B2	NPS 10 Sch 60	SA-106 B Smls pipe	SA-516 70	WN A105 Clase 150
B3	NPS 12 Sch 60	SA-106 B Smls pipe	SA-516 70	WN A105 Clase 150
B4	NPS 2 Sch 160	SA-106 B Smls pipe	SA-516 70	WN A105 Clase 150

Fuente: El autor

Tabla 23: Resumen de bocas

Boca	OD	Dimensiones en in						
		t nom	t req	t min	Cuerpo t nom	Refuerzo Ancho	Refuerzo t	Corr
B5	24	0,5	0,256	0,4375	0,5	3,75	0,5	0,125
B1	12,75	0,5	0,423	0,4375	0,5	3	0,5	0,125
B2	10,75	0,5	0,451	0,4375	0,5	3	0,5	0,125
B3	12,75	0,5	0,466	0,4375	0,45	3	0,5	0,125
B4	2,375	0,344	0,282	0,4375	0,45	2	0,5	0,125

Fuente: El autor



### 3.4.5 Cargas de viento y sismo

Tabla 24: Cargas de viento y sismo

Elemento	h (in)	De (ft)	I (ft <sup>4</sup> )	Vv (lbf)	Mfv (lbf-ft)	Vs (lbf)	Mfs (lbf-ft)
Cabeza #1	450,05	5,08	...	37,20	5,21	176,7	268
Cilindro #1	444,73	5,08	1,582	41,24	9,07	203,1	724,45
Cilindro #2	349,73	5,08	1,582	849,71	8 078	12 303	94 234
Cilindro #3	254,73	5,08	1,582	1 658,2	20 774	17 054	211 354
Cilindro #4	159,73	5,08	1,582	2 466,7	39 027	20 292	360 161
Cilindro #5	64,73	5,08	1,582	3 275,1	64 943	22 166	531 497
Cabeza #2	60	5,08	...	3 315,4	66 238	22 215	540 246
Faldón	0	5,10	2,123	3 705	83 757	22 373	651 902

Fuente: El autor

### 3.5 Lista de materiales

A continuación se presentan los materiales necesarios para la fabricación de la bota de gas según el diseño previo, cabe mencionar que los elementos consumibles a seleccionar como electrodos, película radiográfica, pintura y demás podrían variar según el criterio del fabricante. Las buenas prácticas en construcción recomiendan que el desperdicio de material definido por la relación entre el peso utilizado con el disponible antes de la construcción; no debería sobrepasar el 5%.

$$\text{Desperdicio} = \left(1 - \frac{P_u}{P_d}\right) 100 \quad (233)$$

$$= \left(1 - \frac{6\,891,63 \text{ kg}}{7\,217,06 \text{ kg}}\right) 100 = 4,51\% \quad (\text{Aceptable})$$

Tabla 25: Lista de materiales

Planchas de Acero				
Ítem	N°	Descripción	Material	Peso(Kg)
1	2	PL. 12,7 x 2 440 x 12 000 mm	SA-516-70	2 919,07
2	1	PL. 12,7 x 1 110 x 5 000 mm	SA-516-70	553,31
3	1	PL. 25,4 x 1 200 x 1 200 mm	SA-516-70	287,12
4	1	PL. 15,87 x 1 500 x 5 500 mm	SA-516-70	1 027,78
5	1	PL. 12,7 x 2 200 x 1 400 mm	SS 304	307,06
6	1	PL. 44,45 x 1 500 x 2 000 mm	SA-516-70	1 046,80
7	1	PL. 38,1 x 1 300 x 1 400 mm	SA-516-70	544,33
8	1	PL. 9,52 x 900 x 1 900 mm	SA-36	121,16
9	1	PL. 4,76 x 200 x 350 mm	SA-36	2,60
Barras y Perfiles				
10	1	UPN 120 – 3 000 mm	SA-36	80,40
11	1	RB Ø5/8" x 1 500 mm	SA-36	3,10
12	1	RB Ø3/8" x 1 600 mm	SS-304	2,30
13	2	L 2" x 1/4' x 300 mm	SA-36	2,40
Tuberías				
14	1	PIPE Ø10" SCH 60 SMLS x 1 000 mm	A-106B	81,00

		ASME B. 36.10		
15	1	PIPE Ø2" SCH 160 SMLS x 2 000 mm ASME B. 36.10	A-106B	23,33
16	1	PIPE Ø24" SCH 60 SMLS x 500 mm ASME B. 36.10	A-106B	403,50
17	1	PIPE Ø 1 1/2" SMLS, SCH. 80 x 1 500 mm ASME B36.10	A-106B	8,10
18	1	ELBOW Ø2" SCH 160 90° ASME B. 16.5	A-106B	8,70
19	1	PIPE Ø12" SCH 60 SMLS x 750 mm ASME B. 36.10	A-106B	72,48
<b>Bridas</b>				
20	1	FLANGE Ø10" SCH. 60 ANSI 150# WN.RF ASME B. 16.5	A-105	47,93
21	1	FLANGE Ø2" SCH. 160 ANSI 150# WN.RF ASME B. 16.5	A-105	4,10
22	1	FLANGE Ø24" SCH XS ANSI 150# WN.RF ASME B. 16.5	A-105	128,32
23	1	BLIND FLANGE Ø24" ANSI 150# RF ASME B165	A-105	187,00
24	2	FLANGE Ø12" SCH. 60 ANSI 150# WN.RF ASME B. 16.5	A-105	86,44
<b>Pernos y Empaques</b>				
25	3	GASKET Ø24" 150# RF SPIRAL WOUND, W/ CS O.R.	SS-316	7,13
26	12	S.BOLT Ø 1 3/4 " x 3 1/2" W/2 NUTS E/END	A-193-B7	40,55
27	20	S.BOLT Ø 1 1/4 " x 3 1/2" W/2 NUTS E/END	A-193-B7	39,60
28	14	HEX NUT Ø 5/8" NC W/ WASHER, GALV	SA-194-2H	0,10
29	4	DRIVE SCREW #10 x 6,35	SS-304	1,20
30	12	NUTS Ø3/8" UNC	SS-304	4,80
<b>Consumibles</b>				
31	61	FILM 1 FT WIDTH=100 mm	STRUCTURIS-D7	
32	29	KG ELECTRODE E-7018 Ø1/8"	SFA-5.1	
33	30	KG ELECTRODE E-7018 Ø5/32"	SFA-5.1	
34	31	KG ELECTRODE E-7018 Ø3/16"	SFA-5.1	
35	32	KG ELECTRODE AWS E-71T-1 Ø1,2 mm	SFA-5.20	
36	33	KG ROD AWS ER-70S-6 Ø2.4 mm	SFA-5.18	
37	34	KG WIRE ROD AWS EM12K Ø3,2 mm	SFA-5.17	
38	35	KG FLUX F7A0-EM12K(FUNDENTE INDURA H400)	SFA-5.17	
39	20	GRINDING WHELL Ø7"x1/4"x7/8"		
40	25	CUT-OFF WHELL Ø7"x1/8"x7/8"		
41	15	WIRE WHELL Ø6"x1/2"x5/8"		
42	1	NAME PLATE	304 SS	
43	14	DRIVE SCREW No 10x1/4	304 SS	
<b>Pinturas</b>				
44	7	GLS ZINC INORGANICO	SIGMAZINC 158	
45	9	GLS EPOXICO	SIGMACOVER 630	
46	6	GLS POLIURETANO	SIGMADUR 550	
47	2	GLS THINNER	SIGMA90-53	
48	2	GLS THINNER	SIGMA91-92	
49	2	GLS THINNER	SIGMA21-06	

Fuente: El autor

### 3.6 Procedimiento de pintura

Después de una adecuada preparación de superficie, por lo general SSPC-10 para exteriores; se procede a pintar el recipiente. Cuando su exposición a la corrosión es alta, comúnmente se utilizan los mismos criterios de protección que en la industria marina.

De entre los sistemas de pintura más utilizados están el epóxico, que consta de tres capas de pintura de zinc inorgánico, epóxico y poliuretano con 3, 5 y 2 mils de espesor respectivamente; y el alquídico que consta de dos capas generalmente LIDEROX 7 000 y LIDEROX 4 000 para la primera y segunda.

Cabe mencionar que los sistemas se seleccionan bajo criterios técnico-económicos, siendo el epóxico caro pero técnicamente confiable y el Alquídico barato pero satisfactorio. Además se debe tener presente que la capa de pintura durante el secado o curado disminuye. Si existen varios tipos de pintura se deberán realizar procedimientos acordes a cada elemento. El tiñer complementario es recomendado por el fabricante de la pintura.

#### *Muestra de cálculo sistema epóxico*

- Área del cuerpo: 640,88 ft<sup>2</sup>
- Área de cabezas: 64,58 ft<sup>2</sup>
- Área de faldón: 247,57 ft<sup>2</sup>
- Área de bocas: 32,29 ft<sup>2</sup>
- Área de total: 985,32 ft<sup>2</sup>
- Primera capa: SIGMAZINC 158; Anexo 55, 56, 57.
- Segunda capa: SIGMACOVER 630; Anexo 58, 59.
- Tercera capa: SIGMADUR 550; Anexo 60, 61.
- Porcentaje de pérdida: 60 %

#### • *Primera capa*

$$R_p = R_t - \frac{\%PR_t}{100} \quad (234)$$

$$= 348 - \frac{(60)(348)}{100} = 139,2 \text{ ft}^2/\text{gls}$$

$$C = \frac{A}{R_p} \quad (235)$$

$$= \frac{985,32 \text{ ft}^2}{139,2 \text{ ft}^2/\text{gls}} = 7 \text{ gls}$$

- *Segunda capa*

$$R_p = R_t - \frac{\%PR_t}{100} = 266.6 - \frac{(60)(266.6)}{100} = 106,64 \text{ ft}^2/\text{gls}$$

$$C = \frac{A}{R_p} = \frac{985,32 \text{ ft}^2}{106,64 \text{ ft}^2/\text{gls}} = 9.2 \text{ gls}$$

- *Tercera capa*

$$R_p = R_t - \frac{\%PR_t}{100} = 441 - \frac{(60)(441)}{100} = 176,4 \text{ ft}^2/\text{gls}$$

$$C = \frac{A}{R_p} = \frac{985,32 \text{ ft}^2}{176,4 \text{ ft}^2/\text{gls}} = 5,6 \text{ gls}$$

Dónde;

$R_t$  = Recubrimiento teórico, del Anexo 54, en  $\text{ft}^2/\text{gls}$ .

$R_p$  = Recubrimiento práctico, en  $\text{ft}^2/\text{gls}$ .

$\%P$  = Porcentaje de pérdida.

$C$  = Consumo, en gls.

$A$  = Área, en  $\text{ft}^2$ .

## **CAPÍTULO IV**

### **4 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN**

#### **4.1 Introducción**

Todo proyecto de construcción está ligado a un diseño funcional, seguro y económico. Siendo este último un factor predominante e incluso excluyente sobre los demás. Un proyecto seguro y funcional pero con un alto costo de producción tras un diseño ineficiente, afecta directamente al principio de costo beneficio resultando en la inviabilidad del proyecto.

En el caso puntual de la bota gas con el fin de no encarecer el separador, se redujeron los espesores requeridos del cuerpo del recipiente, tras implementar un anillo de refuerzo en el centro; se utilizó el espesor remanente del comercial con el requerido al reducir el MDMT, evitando así las costosas pruebas de impacto y tratamientos térmicos; sabiendo el alto costo de los estudios radiográficos se seleccionó un análisis de tipo Spot en las juntas circunferenciales, y demás criterios que ayudaron a este fin.

Es claro que la factibilidad económica de un proyecto consta de múltiples factores como el costo cambiante del barril, costo de oportunidad y demás. El presente proyecto tomó como referencia los precios de (BENÍTEZ, 2011 pág. 135), además de parámetros de coteo de diferentes constructores.

#### **4.2 Costos directos**

Son los valores que implican la creación física de los componentes y ensamble del recipiente, así como los procesos interrelacionados para este fin. A continuación se describen los parámetros a cotizar y las horas (hombre) que representarían la construcción de la bota de gas

- Suministro de materiales
- Fabricación de cilindros, cabezas, faldón, soportes, anillo de refuerzo y placa base.
- Fabricación de Aperturas y elementos de izaje
- Instalación de Manhole, aperturas y elementos de izaje

- Fabricación de acoples del sistema y conformación total del recipiente
- Inspección y recepción
- Suministro, accesorios y partes internas

Tabla 26: Horas de trabajo según etapas de construcción

Item	Descripción	No Horas	Costo por hora de mano de obra US 15.6
1	Embalaje despacho	40	624
2	Ingeniería de detalle	192	2 995
3	Lista de materiales	8	124
4	Elaboración de planos	32	499
5	Inspección de avance	156	2 433
6	Revelado y análisis RX	63	982
7	Toma de rayos X	184	2 870
8	Corte mesa recta	20	312
9	Taladrado	4	62
10	Sandblasting interior	91	1 420
11	Sandblasting exterior	44	686
12	Pintura Interior	126	1 966
13	Ensamble	994	15 506
14	Esmerilado soldadura	200	3 120
15	Soldadura MIG	185	2 886
16	Varios Ingeniería	28	437
	<b>TOTAL</b>	<b>2 366</b>	<b>36 924</b>

Fuente: El autor

### 4.3 Costos indirectos

Son los valores administrativos o de la gestión de fabricación. En muchos casos los costos adicionales se suman a esta categoría. Cabe mencionar que los alcances del constructor son mediados inicialmente por ambas partes. A continuación se describen los costos indirectos comúnmente cotizados:

- Gastos administrativos
- Gastos financieros
- Transporte
- Utilidad
- Fiscalización

### 4.4 Viabilidad del proyecto

Según los criterios de ingeniería aplicados en el diseño que se expuso en la introducción del capítulo, con respecto a un ahorro eficiente del material y procesos complementarios complejos. Se determinó que el costo total mostrado en la Tabla 26,

es satisfactorio dada la capacidad y condición de operación, en un marco de seguridad y funcionalidad.

Para un análisis completo de viabilidad sería necesario contar con información de la planta de extracción, incluyendo registros de producción, proyecciones, costos del barril, tiempos de amortización de la inversión, etc.

Tabla 27: Resumen de costos de la bota de gas

Descripción		Valor en dólares
Directos	Suministro	29 271
	Fabricación	36 924
	Ingeniería	3 750
	Pintura	8 276
Indirectos		2 480
Adicionales	Transporte	1 668
	Demister	2 391
	Repuestos	1 439
<b>Total</b>		<b>86 199</b>

Fuente: El autor

## **CAPÍTULO V**

### **5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 Conclusiones**

Por medio del presente trabajo se desarrolló una metodología práctica y actualizada, del diseño de los elementos constitutivos de una bota de gas, aportando además al proyectista con diversos aspectos afines como: lista de materiales, costos de producción, muestras de cálculo para elementos que no constan en el código ASME, planos constructivos y criterios técnicos que arrojó el diseño de este tipo de recipiente, cumpliendo así con el objetivo general de la tesis que planteó el buscar servir a la industria relacionada.

Un punto crucial para el desarrollo de la tesis fue la recopilación de literatura en libros, artículos, foros, revistas científicas, códigos y normas asociadas a la bota de gas, que a más de cumplir con el objetivo específico de recopilar y estudiar la literatura relacionada, ayudó a la comprensión global del tema y el lineamiento a seguir.

Después de haber recopilado y seleccionado la literatura pertinente para el diseño, se optó por la metodología descrita en el proyecto, la cual fue analizada según condiciones: económicas, funcionales, de actualidad, de calidad y específicas de ésta bota de gas, cumpliendo así con el objetivo específico de sintetizar la literatura para proponer y desarrollar el diseño.

Durante la etapa de dimensionamiento hidráulico se determinó la velocidad crítica del gas, que garantiza la separación de las fases líquida y gaseosa; derivando en la obtención del diámetro mínimo para la separación. Debido a la capacidad bruta requerida de 5 000 gls, los factores altura y diámetro interno estuvieron en función del lugar de instalación final, así como de las facilidades de construcción y transporte. El dimensionamiento de las bocas de salida de gas y líquido, se basó en el tiempo de permanencia de la fase líquida en el recipiente y de velocidades de salida recomendadas.



Debido a que las reglas de diseño en los códigos están limitadas a recipientes de formas cilíndricas o esféricas bajo presión interna o externa, y que en sistemas más complejos las fuerzas aplicadas con sus combinaciones no son tomadas en cuenta; se utilizaron los principios de diseño propuestos por Bergman, que considera cargas verticales como el peso del recipiente y su contenido, así como las horizontales incluyendo presiones de sismo, viento y empuje de tuberías. Se concluye que este análisis en comparación con los tradicionales métodos es más real y en consecuencia más seguro.

Se concluye que el MAWP de la boca B5 es el más crítico, debido a que por definición el menor espesor resistirá menos presión, posicionándolo como el dominante y por ende el MAWP de la cámara del recipiente. Además, el cálculo del MAWP en bocas resultó complicado debido a que no tiene una fórmula única y está sujeto a diversas limitaciones. Sin embargo, el uso de software hace que el trabajo de encontrar dicha presión se facilite, a mano sería muy laborioso y poco práctico.

Teniendo en cuenta las graves consecuencias de la rotura frágil debido a la baja tenacidad del material sumada a cargas y temperaturas mínimas, y tras haber reducido el MDMT inicial al utilizar el espesor remanente entre el comercial y requerido; se concluyó que el MDMT más crítico se ubicó en el cilindro 5, convirtiéndose así en el dominante o el punto más frágil térmicamente de la cámara del recipiente.

Según los resultados obtenidos las cargas gobernantes en: faldón, cabezas y cilindros son sísmica, interna y externa respectivamente, para contrarrestar los efectos del pandeo producido por ésta última y disminuir los espesores de cilindros a presión externa, se optó por el uso de un anillo de refuerzo exterior que tiene la función de arriostramiento en el centro de la cámara del recipiente.

Un papel crucial durante el traslado e instalación del recipiente lo cumplen los elementos complementarios oreja de izaje y trunnion, para ello se determinaron los ángulos críticos de diseño de  $11^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente, siendo ésta última la posición en que el peso total es soportado por los dos trunnion. Están sujetos a cargas de tensión, flexión y corte.

## **5.2 Recomendaciones**

Realizar el procedimiento de cálculo para el diseño de la bota de gas con las ecuaciones del código ASME, sección VIII, división 2. Con la finalidad de analizar y comparar los resultados obtenidos en cuestión de espesores, lo cual aportaría a una decisión económica eficiente entre otras cosas.

Por medio de software encontrar valores más exactos del MDMT y MAWP en cada componente del recipiente, con la finalidad de corroborar lo expuesto en el presente proyecto, así como para estudiar su comportamiento al variar parámetros profundamente interrelacionados en su obtención.

Simular por medio de elementos finitos el comportamiento de los fluidos en diferentes condiciones al atravesar el separador; con la finalidad de determinar en qué medida los cambios inesperados en la corriente que ingresa, afectan al proceso de separación y a la vida útil del recipiente.

Analizar el impacto que causaría sobre el espesor del recipiente el no utilizar anillo de refuerzo, o por lo contrario, emplear dos anillos y hasta qué medida se superpondría la reducción de sección con respecto a otros requerimientos del diseño.

Realizar un análisis vibracional post instalación en los lugares críticos del separador, con la finalidad de detectar posibles fallas o anomalías durante su instalación, precautelando así la vida útil de la bota de gas y la seguridad de la planta de producción.

## BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO, AWS D1.5. 2002.** *Design of welded connections*, . Miami, 2002.
- ABB, Havard Devold. 2010.** *Oil and gas production handbook*. 2.3. Oslo-Norway : Oslo, 2010.
- ACS. 2004.** *Separations & Mass - Transfer Productos*. Houston, 2004.
- API, Spec 12J,. 2008.** *Specification for Oil and Gas Separators*, American Petroleum Institute. Washington, DC, 2008.
- ARNOLD, K. and M. Stewart. 2008.** *Surface Production Operation*. 3ra. Amsterdam, 2008.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers. 2013.** *Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Div. 1*. 2013.
- BENÍTEZ, V. Olmedo, P. 2011.** *Diseño de un separador de producción trifásico horizontal para el campo secoya del distrito amazónico*, Tesis EPN. Quito, 2011.
- BERGMAN, Alhambra. 1955.** *The Design of Vertical Pressure Vessels Subjected to Applied Forces*, ASME paper 54-A-104,. Alhambra, Calif, 1955.
- Bryan, JL. 2007.** *Oilfield Equipment*. 2007.
- Coatings, PPG Protective & Marine. 2014.** *Marine Coatings product manual*. Ohio, 2014.
- ESCOE, Heith. 2008.** *Pressure Vessel and Stacks*. Houston, T, 2008.
- GPS A, Engineering Data Book. 1998.** *Processors Suppliers Association*. 11. Tulsa, 1998. Vol. 1.
- INDURA. 2007.** *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. 2007.
- MANNING and Thompson, R.E. 1995.** *Oil Field Processing*. Tulsa, Ok : Pennwell Publishing Company, 1995. Vol. 2.
- MEGYESY, Eugene. 2008.** *Pressure Vessel Handbook*. Tulsa, Oklahoma : PV PUBLISHING, ING., 2008.
- MOSQUERA, y Rodriguez. 2010.** *Optimización de las facilidades de producción del campo Cuyabeno, (Tesis), Ingeniería en Petróleos, EPN*. Quito, 2010.
- NEC. 2014.** *Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo Resistente*. Quito, 2014.
- POE, Saeid Mokhatab. William A. 2006.** *Handbook Of Natural Gas Transmission And Processing*. 1ra. ELSEVIER, 2006.
- POPOV, Egor. 2000.** *Mecánica de Sólidos*. 2. Berkeley, 2000. pág. 888.
- Schlumberger. 2005.** *Oilfield Review*. [ed.] Gretchen M. Gillis. Houston, 2005.

**SVRCEK, Monnery. 1993.** *Design Two-Phase Separators Within the Right Limits*, *CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS*. Alberta, 1993.

**SVRCEK, Monnery. 1994.** *Successfully Specify Three-Phase Separators*, *CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS*. Alberta, 1994.

**UBC. 1997.** *Structural Design Requirements*. 1997. Vol. 2.

**VERTEX. 2010.** VERTEX, Engineering Co. [En línea] 2010. <http://www.vertex-engineering.com/servDished.php>.